

**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**

Escuela Politécnica Superior - Leganés

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**



**PROYECTO FIN DE CARRERA**

**Estudio Comparativo Sistema de Señalización de Metro  
Cantón Fijo frente a Cantón Móvil**

AUTOR: ELENA FERNÁNDEZ DEL VISO MORÁN

TUTOR: DR. RAÚL SÁNCHEZ REÍLLO / ANTONIO J. GARCÍA QUINTAS

**Leganés, 2015**



## Índice de Contenidos

|           |  |          |
|-----------|--|----------|
| <b>1</b>  | <b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN</b>  | <b>1</b> |
| 1.1       | Motivación del Proyecto  | 1        |
| 1.2       | Objetivos del Proyecto   | 5        |
| 1.3       | Estructura del Proyecto  | 6        |
| <b>2</b>  | <b>CAPÍTULO 2: SISTEMAS DE SEÑALIZACIÓN</b>                              | <b>8</b> |
| 2.1       | Historia de los sistemas de señalización y su evolución                  | 8        |
| 2.1.1     | Primeros Sistemas de Señalización  | 8        |
| 2.1.2     | Primeros Enclavamientos Mecánicos y Señalización en Cabina               | 10       |
| 2.1.3     | Diagramas de Tiempo – Bloqueo Fijo                                       | 11       |
| 2.1.4     | Bloqueo Telegráfico y Telefónico   | 12       |
| 2.1.5     | Bloqueo Automático   | 13       |
| 2.1.6     | Sistema de Protección Automático de Tren                                 | 14       |
| 2.1.7     | Enclavamiento Electrónico  | 14       |
| 2.1.8     | Sistemas ATP Puntuales y Continuos                                       | 15       |
| 2.1.9     | Operación Automática de Trenes   | 15       |
| 2.1.10    | Comunicación por Radio y Sistemas sin Conductor                          | 15       |
| 2.2       | Introducción al concepto de señalización                                 | 16       |
| 2.3       | Descripción del Sistema de Control Ferroviario                           | 17       |
| 2.4       | Equipamientos del sistema de señalización                                | 19       |
| 2.4.1     | Sistemas de Señalización en Vía  | 20       |
| 2.4.1.1   | Equipamiento de Vía: Sistemas de Detección de Tren                       | 23       |
| 2.4.1.1.1 | Circuito de Vía con Juntas Inductivas                                    | 23       |
| 2.4.1.1.2 | Circuito de Vía sin Juntas Inductivas                                    | 24       |
| 2.4.1.1.3 | Contadores de Ejes   | 26       |
| 2.4.1.2   | Equipamiento de Vía: Aparatos de Vía                                     | 27       |
| 2.4.1.2.1 | Aparatos de Vía: Desvíos   | 28       |
| 2.4.1.2.2 | Aparatos de Vía: Escape  | 30       |
| 2.4.1.2.3 | Aparatos de Vía: Travesías   | 30       |
| 2.4.1.3   | Equipamiento de Vía: Señales   | 30       |
| 2.4.1.4   | Equipamiento de Vía: Sistemas de Transmisión                             | 31       |
| 2.4.1.4.1 | Balizas  | 31       |
| 2.4.1.4.2 | Circuitos de Vía Codificados   | 32       |
| 2.4.1.4.3 | Lazos de Transmisión   | 33       |
| 2.4.1.5   | Equipamiento de Vía: Sistema de Radio                                    | 34       |
| 2.4.1.6   | Sistema de Control y Supervisión de los Elementos de Vía - Enclavamiento | 36       |
| 2.4.1.7   | Sistema de Bloqueo Móvil por Radio                                       | 39       |
| 2.4.2     | Sistemas de Señalización Embarcado en Material Móvil                     | 40       |
| 2.4.2.1   | Sistema de Protección Automático de Tren                                 | 40       |
| 2.4.2.2   | Sistema de Operación Automático de Tren                                  | 42       |
| 2.5       | Clasificación de los tipos de sistemas de señalización                   | 44       |
| 2.5.1     | Tipo de Cantonamiento – Cantón Fijo / Móvil                              | 44       |



|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| 2.5.2      | Nivel de Protección: Sistema de Protección Automático: Puntual - Continuo | 46        |
| 2.5.3      | Nivel de Automatización: ATO-UTO  | 49        |
| 2.5.3.1    | GoA 0 – Conducción Manual   | 50        |
| 2.5.3.2    | GoA 1 – ATP - Automatic Train Operation                                   | 50        |
| 2.5.3.3    | GoA 2 – ATP + ATO Semi-automated Train Operation                          | 50        |
| 2.5.3.4    | GoA 3 – DTO - Driverless Train Operation                                  | 51        |
| 2.5.3.5    | GoA 4 – UTO - Unattended Train Operation                                  | 51        |
| <b>3</b>   | <b>CAPÍTULO 3: EJECUCIÓN Y SELECCIÓN DEL SISTEMA DE SEÑALIZACIÓN</b>      | <b>52</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Etapas en el Desarrollo de un Sistema de Señalización</b>              | <b>52</b> |
| 3.1.1      | Iniciación de Proyecto  | 53        |
| 3.1.2      | Estructura de Productos   | 53        |
| 3.1.3      | Definición de Planes de Proyecto  | 54        |
| 3.1.4      | Diseño Preliminar   | 55        |
| 3.1.5      | Requisitos Subsistemas  | 55        |
| 3.1.6      | Diseño Detallado  | 55        |
| 3.1.7      | Implementación del Software   | 56        |
| 3.1.8      | Fabricación de Equipos  | 56        |
| 3.1.9      | Pruebas de Subsistemas  | 56        |
| 3.1.10     | Integración y Pruebas de Sistema  | 56        |
| 3.1.11     | Autorización para la Instalación  | 57        |
| 3.1.12     | Transferencia del Proyecto a Instalaciones                                | 57        |
| <b>3.2</b> | <b>Etapas en la Instalación y Pruebas de un Sistema de Señalización</b>   | <b>58</b> |
| 3.2.1      | Plan de Instalación y Puesta en Servicio                                  | 59        |
| 3.2.2      | Establecer Base para la Instalación                                       | 59        |
| 3.2.3      | Recepción del Material en la Instalación                                  | 60        |
| 3.2.4      | Instalación de Equipamiento   | 60        |
| 3.2.5      | Inspección de la Instalación  | 60        |
| 3.2.6      | Realimentación de Diseño Detallado  | 61        |
| 3.2.7      | Pruebas de Concordancia   | 61        |
| 3.2.8      | Fase de Puesta en Servicio  | 61        |
| 3.2.9      | Autorización para la Puesta en Servicio Comercial                         | 62        |
| 3.2.10     | Aceptación del Sistema por el cliente                                     | 62        |
| 3.2.11     | Transferencia del Proyecto a Mantenimiento                                | 62        |
| <b>3.3</b> | <b>Actividades de Mantenimiento de un Sistema de Señalización</b>         | <b>63</b> |
| 3.3.1      | Mantenimiento Preventivo  | 64        |
| 3.3.1.1    | Mantenimiento Cíclico Programado  | 64        |
| 3.3.1.2    | Mantenimiento Preventivo según Estado                                     | 65        |
| 3.3.1.3    | Mantenimiento Preventivo Predictivo                                       | 65        |
| 3.3.1.4    | Mantenimiento Preventivo Extraordinario                                   | 65        |
| 3.3.2      | Mantenimiento Correctivo  | 65        |
| 3.3.2.1    | Mantenimiento Correctivo derivado del Preventivo                          | 66        |
| 3.3.2.2    | Mantenimiento Correctivo en caso de Avería                                | 66        |
| 3.3.3      | Sistema de Reporte de Fallos y Acciones Correctivas - FRACAS              | 67        |
| 3.3.3.1    | Iniciación – Reporte del Fallo  | 68        |
| 3.3.3.2    | Análisis del Fallo  | 68        |
| 3.3.3.3    | Implementación Acción Correctiva  | 69        |
| 3.3.3.4    | Verificación Acción Correctiva  | 69        |
| <b>3.4</b> | <b>Criterios de Selección de un Sistema de Señalización</b>               | <b>70</b> |



|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| 3.4.1      | Capacidad  | 70        |
| 3.4.2      | Fiabilidad   | 70        |
| 3.4.3      | Mantenibilidad   | 71        |
| 3.4.4      | Disponibilidad   | 71        |
| 3.4.5      | Coste  | 72        |
| <b>4</b>   | <b>CAPÍTULO 4: MODELIZACIÓN DEL SISTEMA DE SEÑALIZACIÓN</b>                      | <b>73</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Características del Trazado de Vía</b>  | <b>73</b> |
| 4.1.1      | Definición de la Longitud y el número de Estaciones de la Línea                  | 73        |
| 4.1.2      | Definición del Trazado de Vía  | 74        |
| 4.1.3      | División en Áreas de Control   | 74        |
| 4.1.4      | Definición de la Restricción Civil de Velocidad del Trazado de Vía               | 74        |
| 4.1.5      | Definición del Radio de Curvatura del Trazado de Vía                             | 75        |
| 4.1.6      | Definición del Gradiente del Trazado de Vía                                      | 75        |
| <b>4.2</b> | <b>Características del Tren</b>  | <b>83</b> |
| 4.2.1      | Parámetros básicos   | 83        |
| 4.2.2      | Parámetros operacionales   | 83        |
| 4.2.3      | Esfuerzo de tracción   | 84        |
| 4.2.4      | Esfuerzo de frenado  | 85        |
| 4.2.5      | Resistencia Aerodinámica   | 85        |
| <b>4.3</b> | <b>Características de la Solución de Señalización</b>                            | <b>86</b> |
| 4.3.1      | Solución de Señalización de Cantón Fijo  | 86        |
| 4.3.2      | Solución de Señalización de Cantón Móvil   | 86        |
| <b>5</b>   | <b>CAPÍTULO 5: CÁLCULO DE PARÁMETROS DEL SISTEMA DE SEÑALIZACIÓN</b>             | <b>87</b> |
| <b>5.1</b> | <b>Cálculos de los Parámetros de Fiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad</b> | <b>87</b> |
| 5.1.1      | Sistema de Señalización de Cantón Fijo   | 87        |
| 5.1.1.1    | Módulo Funcional Equipamiento de Vía   | 87        |
| 5.1.1.1.1  | Listado de Material Equipamiento de Vía  | 87        |
| 5.1.1.1.2  | Fiabilidad Equipamiento de Vía   | 88        |
| 5.1.1.1.3  | Mantenibilidad Equipamiento de Vía   | 88        |
| 5.1.1.1.4  | Disponibilidad Equipamiento de Vía   | 89        |
| 5.1.1.2    | Módulo Funcional Sistema Controlador de Equipamiento de Vía                      | 90        |
| 5.1.1.2.1  | Listado de Material Sistema Controlador de Equipamiento de Vía                   | 91        |
| 5.1.1.2.2  | Fiabilidad Sistema Controlador de Equipamiento de Vía                            | 92        |
| 5.1.1.2.3  | Mantenibilidad Sistema Controlador de Equipamiento de Vía                        | 92        |
| 5.1.1.2.4  | Disponibilidad Sistema Controlador de Equipamiento de Vía                        | 93        |
| 5.1.1.3    | Módulo Funcional Unidad Central de Procesamiento                                 | 94        |
| 5.1.1.3.1  | Listado de Material Unidad Central de Procesamiento                              | 94        |
| 5.1.1.3.2  | Fiabilidad Unidad Central de Procesamiento                                       | 95        |
| 5.1.1.3.3  | Mantenibilidad Unidad Central de Procesamiento                                   | 95        |
| 5.1.1.3.4  | Disponibilidad Unidad Central de Procesamiento                                   | 95        |
| 5.1.1.4    | Módulo Funcional Sistema de Señalización Embarcado en Material Móvil             | 96        |
| 5.1.1.4.1  | Listado de Material Sistema de Señalización Embarcado en Material Móvil          | 96        |
| 5.1.1.4.2  | Fiabilidad Sistema de Señalización Embarcado en Material Móvil                   | 97        |
| 5.1.1.4.3  | Mantenibilidad Sistema de Señalización Embarcado en Material Móvil               | 98        |
| 5.1.1.4.4  | Disponibilidad Sistema de Señalización Embarcado en Material Móvil               | 98        |
| 5.1.2      | Sistema de Señalización de Cantón Móvil  | 99        |
| 5.1.2.1    | Módulo Funcional Equipamiento de Vía   | 99        |



|            |  |            |
|------------|--|------------|
| 5.1.2.1.1  | Listado de Material Equipamiento de Vía                              | 99         |
| 5.1.2.1.2  | Fiabilidad Equipamiento de Vía                                       | 100        |
| 5.1.2.1.3  | Mantenibilidad Equipamiento de Vía                                   | 100        |
| 5.1.2.1.4  | Disponibilidad Equipamiento de Vía                                   | 100        |
| 5.1.2.2    | Módulo Funcional Sistema Controlador de Equipamiento de Vía          | 101        |
| 5.1.2.2.1  | Listado de Material Sistema Controlador de Equipamiento de Vía       | 102        |
| 5.1.2.2.2  | Fiabilidad Sistema Controlador de Equipamiento de Vía                | 102        |
| 5.1.2.2.3  | Mantenibilidad Sistema Controlador de Equipamiento de Vía            | 103        |
| 5.1.2.2.4  | Disponibilidad Sistema Controlador de Equipamiento de Vía            | 103        |
| 5.1.2.3    | Módulo Funcional Unidad Central de Procesamiento                     | 104        |
| 5.1.2.3.1  | Listado de Material Unidad Central de Procesamiento                  | 105        |
| 5.1.2.3.2  | Fiabilidad Unidad Central de Procesamiento                           | 105        |
| 5.1.2.3.3  | Mantenibilidad Unidad Central de Procesamiento                       | 105        |
| 5.1.2.3.4  | Disponibilidad Unidad Central de Procesamiento                       | 106        |
| 5.1.2.4    | Módulo Funcional Sistema de Bloqueo Móvil por Radio                  | 106        |
| 5.1.2.4.1  | Listado de Material Sistema de Bloqueo Móvil por Radio               | 107        |
| 5.1.2.4.2  | Fiabilidad Sistema de Bloqueo Móvil por Radio                        | 107        |
| 5.1.2.4.3  | Mantenibilidad Sistema de Bloqueo Móvil por Radio                    | 108        |
| 5.1.2.4.4  | Disponibilidad Sistema de Bloqueo Móvil por Radio                    | 108        |
| 5.1.2.5    | Módulo Funcional Sistema de Señalización Embarcado Material Móvil    | 109        |
| 5.1.2.5.1  | Listado de Material Sistema de Señalización Embarcado Material Móvil | 109        |
| 5.1.2.5.2  | Fiabilidad Sistema de Señalización Embarcado Material Móvil          | 110        |
| 5.1.2.5.3  | Mantenibilidad Sistema de Señalización Embarcado Material Móvil      | 111        |
| 5.1.2.5.4  | Disponibilidad Sistema de Señalización Embarcado Material Móvil      | 111        |
| <b>5.2</b> | <b>Cálculo del Parámetro Coste</b>                                   | <b>112</b> |
| 5.2.1      | Sistema de Señalización de Cantón Fijo                               | 112        |
| 5.2.1.1    | Coste del Material   | 112        |
| 5.2.1.2    | Costes de Ejecución: desarrollo, pruebas y puesta en servicio        | 114        |
| 5.2.1.3    | Coste de Mantenimiento   | 115        |
| 5.2.1.4    | Coste Total  | 115        |
| 5.2.2      | Sistema de Señalización de Cantón Móvil                              | 116        |
| 5.2.2.1    | Coste del Material   | 116        |
| 5.2.2.2    | Coste de Ejecución: desarrollo, pruebas y puesta en servicio         | 117        |
| 5.2.2.3    | Coste de Mantenimiento   | 119        |
| 5.2.2.4    | Coste Total  | 119        |
| <b>5.3</b> | <b>Cálculo del Parámetro Tiempo de Recorrido de la Línea</b>         | <b>120</b> |
| 5.3.1      | Precondiciones de Simulación   | 120        |
| 5.3.2      | Cálculo de los Tiempos de Recorrido                                  | 120        |
| 5.3.3      | Análisis del Perfil de Velocidad                                     | 122        |
| <b>5.4</b> | <b>Cálculo del Parámetro Capacidad de la Línea</b>                   | <b>123</b> |
| 5.4.1      | Sistema de Señalización de Cantón Fijo                               | 123        |
| 5.4.1.1    | Precondiciones de Simulación   | 123        |
| 5.4.1.2    | Cálculo del Tiempo entre Trenes                                      | 123        |
| 5.4.1.3    | Secuencia de Recorrido   | 124        |
| 5.4.1.4    | Cálculo de la Capacidad de la Línea                                  | 127        |
| 5.4.2      | Sistema de Señalización de Cantón Móvil                              | 127        |
| 5.4.2.1    | Precondiciones de Simulación   | 127        |
| 5.4.2.2    | Cálculo del Tiempo entre Trenes                                      | 127        |
| 5.4.2.3    | Secuencia de Recorrido   | 128        |



|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 5.4.2.4  | Cálculo de la Capacidad de la Línea                                 | 130        |
| <b>6</b> | <b>CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS</b>                       | <b>131</b> |
| 6.1      | Relación entre los parámetros calculados y el resultado obtenido    | 131        |
| 6.1.1    | Comparativa Disponibilidad  | 131        |
| 6.1.2    | Comparativa Costes – Coste de Materiales, Ejecución y Mantenimiento | 132        |
| 6.1.3    | Comparativa Intervalo entre Trenes - Capacidad de la Línea          | 134        |
| 6.2      | Elección del Sistema de Señalización                                | 136        |
| <b>7</b> | <b>CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES</b>                                     | <b>138</b> |
| 7.1      | Conclusiones derivadas del análisis                                 | 138        |
| 7.2      | Líneas de trabajo derivadas del presente proyecto                   | 139        |
| <b>8</b> | <b>CAPÍTULO 8: BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS</b>                       | <b>140</b> |
| <b>9</b> | <b>CAPÍTULO 9: LISTA DE ACRÓNIMOS</b>                               | <b>142</b> |



## Índice de Ilustraciones

|  |           |
|--|-----------|
| <i>Ilustración 1: EU Transport in Figures 2014 - Comparación Población Mundial .....</i>                 | <i>1</i>  |
| <i>Ilustración 2: EU Transport in Figures 2014 – Comparación Tipo de Transporte de Pasajeros.....</i>    | <i>2</i>  |
| <i>Ilustración 3: Study to Support an Urban Mobility Package 2013 - Costes Sistema de Transporte ...</i> | <i>3</i>  |
| <i>Ilustración 4: Primer Sistema de Señales - Banderas .....</i>   | <i>8</i>  |
| <i>Ilustración 5: Señales Mecánicas - Postes .....</i>   | <i>9</i>  |
| <i>Ilustración 6: Cerradura Bourè.....</i>   | <i>10</i> |
| <i>Ilustración 7: Enclavamiento Mecánico de Palancas.....</i>  | <i>11</i> |
| <i>Ilustración 8: Bloqueo Automático Ocupado - Tren Precedente en Estación.....</i>                      | <i>13</i> |
| <i>Ilustración 9: Bloqueo Automático Libre - Tren Precedente abandona Estación.....</i>                  | <i>13</i> |
| <i>Ilustración 10: Diagrama Arquitectura de Señalización .....</i>                                       | <i>18</i> |
| <i>Ilustración 11: Equipamiento Sistema Señalización .....</i>   | <i>19</i> |
| <i>Ilustración 12: Sección Sistema de Vía .....</i>  | <i>20</i> |
| <i>Ilustración 13: Distancia entre Traviesas.....</i>  | <i>21</i> |
| <i>Ilustración 14: Conjunto Carril - Traviesa - Balastro .....</i>                                       | <i>21</i> |
| <i>Ilustración 15: Estructura de la Vía en Placa.....</i>  | <i>22</i> |
| <i>Ilustración 16: Vía en Placa de Hormigón.....</i>   | <i>22</i> |
| <i>Ilustración 17: Circuito de vía Libre.....</i>  | <i>24</i> |
| <i>Ilustración 18: Circuito de vía Ocupado.....</i>  | <i>24</i> |
| <i>Ilustración 19: Circuito de Vía Sin Juntas .....</i>  | <i>25</i> |
| <i>Ilustración 20: Bastidor de Circuitos de Vía.....</i>   | <i>25</i> |
| <i>Ilustración 21: Sensor de Rueda.....</i>  | <i>26</i> |
| <i>Ilustración 22: Sistema Contador de Ejes.....</i>   | <i>26</i> |
| <i>Ilustración 23: Tipos de Aparatos de Vía.....</i>   | <i>27</i> |
| <i>Ilustración 24: Componentes del Desvío .....</i>  | <i>28</i> |
| <i>Ilustración 25: Esquema del Desvío .....</i>  | <i>28</i> |
| <i>Ilustración 26: Esquema del Cruzamiento .....</i>   | <i>29</i> |
| <i>Ilustración 27: Cruzamiento Corazón Móvil .....</i>   | <i>29</i> |
| <i>Ilustración 28: Travesía.....</i>   | <i>30</i> |
| <i>Ilustración 29: Baliza.....</i>   | <i>31</i> |
| <i>Ilustración 30: Funcionamiento Baliza Controlada.....</i>   | <i>32</i> |
| <i>Ilustración 31: Circuitos de Vía Codificados .....</i>  | <i>32</i> |





|   |           |
|---|-----------|
| <i>Ilustración 32: Transmisión de datos desde el circuito de vía codificado al tren .....</i> | <i>33</i> |
| <i>Ilustración 33: Configuración Lazos de Transmisión en Aguja .....</i>                      | <i>33</i> |
| <i>Ilustración 34: Arquitectura Sistema de Radio por Antena .....</i>                         | <i>34</i> |
| <i>Ilustración 35: Arquitectura Sistema de Radio por cable radiante .....</i>                 | <i>35</i> |
| <i>Ilustración 36: Antenas de Tren .....</i>  | <i>35</i> |
| <i>Ilustración 37: Distribución de Enclavamientos en una Línea .....</i>                      | <i>36</i> |
| <i>Ilustración 38: Arquitectura del Enclavamiento Electrónico .....</i>                       | <i>37</i> |
| <i>Ilustración 39: Formación de Itinerario.....</i>   | <i>38</i> |
| <i>Ilustración 40: Sistema de Bloqueo Móvil por Radio .....</i>                               | <i>39</i> |
| <i>Ilustración 41: Situación Del Equipamiento de Protección en el Tren .....</i>              | <i>40</i> |
| <i>Ilustración 42: Arquitectura del Sistema de Protección Automático de Tren .....</i>        | <i>41</i> |
| <i>Ilustración 43: Regulación de Velocidad ATO .....</i>                                      | <i>42</i> |
| <i>Ilustración 44: Sistema de Cantón Fijo .....</i>   | <i>44</i> |
| <i>Ilustración 45: Sistema de Cantón Fijo Optimizado .....</i>                                | <i>45</i> |
| <i>Ilustración 46: Ocupación del Tren .....</i>   | <i>45</i> |
| <i>Ilustración 47: Ocupación Virtual .....</i>  | <i>45</i> |
| <i>Ilustración 48: Sistema de Cantón Móvil.....</i>   | <i>46</i> |
| <i>Ilustración 49: Sistema de Protección Automático Puntual .....</i>                         | <i>47</i> |
| <i>Ilustración 50: Sistema de Velocidad Máxima/Velocidad Objetivo .....</i>                   | <i>48</i> |
| <i>Ilustración 51: Sistema de Distancia Objetivo.....</i>                                     | <i>48</i> |
| <i>Ilustración 52: Sistema de cantón Móvil .....</i>  | <i>49</i> |
| <i>Ilustración 53: Grados de Automatización (GoA).....</i>                                    | <i>49</i> |
| <i>Ilustración 54: Etapas en el Desarrollo de un Sistema de Señalización.....</i>             | <i>52</i> |
| <i>Ilustración 55: Etapas en la Instalación de un Sistema de Señalización .....</i>           | <i>58</i> |
| <i>Ilustración 56: Tipos de Curvas de Fallo.....</i>  | <i>64</i> |
| <i>Ilustración 57: Etapas Mantenimiento Correctivo en caso de Avería .....</i>                | <i>66</i> |
| <i>Ilustración 58: Etapas Sistema FRACAS.....</i>   | <i>67</i> |
| <i>Ilustración 59: Vuelta - Alternativa 1 .....</i>   | <i>70</i> |
| <i>Ilustración 60: Vuelta - Alternativa 2 .....</i>   | <i>70</i> |
| <i>Ilustración 61: Tiempo Medio entre Fallos (MTBF).....</i>                                  | <i>71</i> |
| <i>Ilustración 62: Esquema de Vía - Cantón Fijo .....</i>                                     | <i>76</i> |
| <i>Ilustración 63: Esquema de Vía - Cantón Móvil.....</i>                                     | <i>77</i> |
| <i>Ilustración 64: Distribución Sistema Controlador Cantón Fijo.....</i>                      | <i>78</i> |
| <i>Ilustración 65: Distribución Sistema Controlador Cantón Móvil.....</i>                     | <i>79</i> |





|   |            |
|---|------------|
| <i>Ilustración 66: Distribución de Unidades Centrales de Procesamiento .....</i>                        | <i>80</i>  |
| <i>Ilustración 67: Trazado de Vía - Restricción Civil .....</i>   | <i>81</i>  |
| <i>Ilustración 68: Trazado de Vía - Radio de Curvatura.....</i>   | <i>82</i>  |
| <i>Ilustración 69: Esfuerzo de Tracción.....</i>  | <i>84</i>  |
| <i>Ilustración 70: Curva de Frenado de Emergencia .....</i>   | <i>85</i>  |
| <i>Ilustración 71: Módulo Funcional Equipamiento de Vía Cantón Fijo .....</i>                           | <i>87</i>  |
| <i>Ilustración 72: Módulo Funcional Sistema Controlador de Equipamiento de Vía Cantón Fijo.....</i>     | <i>91</i>  |
| <i>Ilustración 73: Módulo Funcional Unidad Central de Procesamiento .....</i>                           | <i>94</i>  |
| <i>Ilustración 74: Módulo Funcional Sistema de Señalización Embarcado en Material Móvil .....</i>       | <i>96</i>  |
| <i>Ilustración 75: Módulo Funcional Equipamiento de Vía Cantón Móvil.....</i>                           | <i>99</i>  |
| <i>Ilustración 76: Módulo Funcional Sistema Controlador de Equipamiento de Vía Cantón Móvil.....</i>    | <i>102</i> |
| <i>Ilustración 77: Módulo Funcional Unidad Central de Procesamiento .....</i>                           | <i>104</i> |
| <i>Ilustración 78: Módulo Funcional Sistema de Bloqueo Móvil por Radio .....</i>                        | <i>107</i> |
| <i>Ilustración 79: Módulo Funcional Sistema de Señalización Embarcado Material Móvil .....</i>          | <i>109</i> |
| <i>Ilustración 80: Perfil de Velocidad Sección 1.....</i>   | <i>122</i> |
| <i>Ilustración 81: Perfil de Velocidad Sección 2.....</i>   | <i>122</i> |
| <i>Ilustración 82: Tramo Estación 6 Estación 8 - Cantón Fijo.....</i>                                   | <i>124</i> |
| <i>Ilustración 83: Simulación Estaciones y Señales Cantón Fijo .....</i>                                | <i>124</i> |
| <i>Ilustración 84: Primer Tren Saliendo de Estación 6.....</i>  | <i>125</i> |
| <i>Ilustración 85: Primer Tren entre Estación 6 y Estación 7.....</i>                                   | <i>125</i> |
| <i>Ilustración 86: Primer tren rebasa la inter-estación .....</i>                                       | <i>125</i> |
| <i>Ilustración 87: Primer Tren en Estación 7.....</i>   | <i>125</i> |
| <i>Ilustración 88: Segundo Tren sale de Estación 6 - Primer tren entre Estación 7 y Estación 8.....</i> | <i>126</i> |
| <i>Ilustración 89: Segundo tren entre Estación 6 y Estación 7 - Segundo tren en Estación 8.....</i>     | <i>126</i> |
| <i>Ilustración 90: Segundo tren en Estación 7 - Segundo tren sale de Estación 8.....</i>                | <i>126</i> |
| <i>Ilustración 91: Segundo tren entre Estación 7 y Estación 8 .....</i>                                 | <i>126</i> |
| <i>Ilustración 92: Segundo tren sale de Estación 8.....</i>   | <i>126</i> |
| <i>Ilustración 93: Tramos Estación 6 - Estación 8 - Cantón Móvil .....</i>                              | <i>128</i> |
| <i>Ilustración 94: Simulación Estaciones Cantón Móvil .....</i>   | <i>128</i> |
| <i>Ilustración 95: Primer Tren saliendo de la Estación 6.....</i>                                       | <i>128</i> |
| <i>Ilustración 96: Primer Tren entre Estación 6 y Estación 7.....</i>                                   | <i>129</i> |
| <i>Ilustración 97: Segundo Tren sale de Estación 6 - Primer Tren llegando a Estación 7.....</i>         | <i>129</i> |
| <i>Ilustración 98: Primer tren entre Estación 6 y Estación 7 - Segundo tren en Estación 7.....</i>      | <i>129</i> |
| <i>Ilustración 99: Primer tren abandona Estación 7 antes de la llegada del Segundo tren .....</i>       | <i>129</i> |



|   |            |
|---|------------|
| <i>Ilustración 100: Segundo tren en Estación 7 - Primer tren entre Estación 7 y Estación 8.....</i> | <i>130</i> |
| <i>Ilustración 101: Primer tren en Estación 8 - Segundo tren entre Estación 7 y Estación 8.....</i> | <i>130</i> |
| <i>Ilustración 102: Primer tren abandona Estación 8 antes de la llegada del Segundo tren .....</i>  | <i>130</i> |
| <i>Ilustración 103: Segundo tren abandona la Estación 8 .....</i>                                   | <i>130</i> |
| <i>Ilustración 104: Gráfica Comparativa Disponibilidad .....</i>                                    | <i>131</i> |
| <i>Ilustración 105: Gráfica Comparativa Fiabilidad – Tasa de Fallo .....</i>                        | <i>132</i> |
| <i>Ilustración 106: Gráfica Comparativa Coste – Materiales.....</i>                                 | <i>133</i> |
| <i>Ilustración 107: Gráfica Comparativa Coste – Ejecución.....</i>                                  | <i>133</i> |
| <i>Ilustración 108: Gráfica Comparativa Coste - Mantenimiento .....</i>                             | <i>134</i> |
| <i>Ilustración 109: Gráfica Comparativa - Intervalo entre Trenes .....</i>                          | <i>135</i> |
| <i>Ilustración 110: Gráfica Comparativa - Capacidad de la Línea .....</i>                           | <i>135</i> |



## Índice de Tablas

|  |            |
|--|------------|
| <i>Tabla 1: Parámetros Básicos del Tren.....</i>   | <i>83</i>  |
| <i>Tabla 2: Parámetros Operacionales del Tren.....</i>   | <i>83</i>  |
| <i>Tabla 3: Listado de Material Equipamiento de Vía Cantón Fijo.....</i>                             | <i>88</i>  |
| <i>Tabla 4: Fiabilidad Equipamiento de Vía Cantón Fijo.....</i>                                      | <i>88</i>  |
| <i>Tabla 5: Mantenibilidad Equipamiento de Vía Cantón Fijo.....</i>                                  | <i>89</i>  |
| <i>Tabla 6: Disponibilidad Equipamiento de Vía Cantón Fijo.....</i>                                  | <i>90</i>  |
| <i>Tabla 7: Listado de Material Sistema Controlador de Equipamiento de Vía Cantón Fijo.....</i>      | <i>92</i>  |
| <i>Tabla 8: Fiabilidad Sistema Controlador de Equipamiento de Vía Cantón Fijo.....</i>               | <i>92</i>  |
| <i>Tabla 9: Mantenibilidad Sistema Controlador de Equipamiento de Vía Cantón Fijo.....</i>           | <i>93</i>  |
| <i>Tabla 10: Disponibilidad Sistema Controlador de Equipamiento de Vía Cantón Fijo.....</i>          | <i>93</i>  |
| <i>Tabla 11: Listado de Material Unidad Central de Procesamiento Cantón Fijo.....</i>                | <i>94</i>  |
| <i>Tabla 12: Fiabilidad Unidad Central de Procesamiento Cantón Fijo.....</i>                         | <i>95</i>  |
| <i>Tabla 13: Mantenibilidad Unidad Central de Procesamiento Cantón Fijo.....</i>                     | <i>95</i>  |
| <i>Tabla 14: Disponibilidad Unidad Central de Procesamiento Cantón Fijo.....</i>                     | <i>96</i>  |
| <i>Tabla 15: Listado de Material Sistema Señalización Embarcado Material Móvil Cantón Fijo.....</i>  | <i>97</i>  |
| <i>Tabla 16: Fiabilidad Sistema de Señalización Embarcado en Material Móvil Cantón Fijo.....</i>     | <i>97</i>  |
| <i>Tabla 17: Mantenibilidad Sistema de Señalización Embarcado en Material Móvil Cantón Fijo.....</i> | <i>98</i>  |
| <i>Tabla 18: Disponibilidad Sistema de Señalización Embarcado en Material Móvil Cantón Fijo.....</i> | <i>99</i>  |
| <i>Tabla 19: Listado de Material Equipamiento de Vía Cantón Móvil.....</i>                           | <i>99</i>  |
| <i>Tabla 20: Fiabilidad Equipamiento de Vía Cantón Móvil.....</i>                                    | <i>100</i> |
| <i>Tabla 21: Mantenibilidad Equipamiento de Vía Cantón Móvil.....</i>                                | <i>100</i> |
| <i>Tabla 22: Disponibilidad Equipamiento de Vía Cantón Móvil.....</i>                                | <i>101</i> |
| <i>Tabla 23: Listado de Material Sistema Controlador de Equipamiento de Vía Cantón Móvil.....</i>    | <i>102</i> |
| <i>Tabla 24: Fiabilidad Sistema Controlador de Equipamiento de Vía Cantón Móvil.....</i>             | <i>103</i> |
| <i>Tabla 25: Mantenibilidad Sistema Controlador de Equipamiento de Vía Cantón Móvil.....</i>         | <i>103</i> |
| <i>Tabla 26: Disponibilidad Sistema Controlador de Equipamiento de Vía Cantón Móvil.....</i>         | <i>104</i> |
| <i>Tabla 27: Listado de Material Unidad Central de Procesamiento Cantón Móvil.....</i>               | <i>105</i> |
| <i>Tabla 28: Fiabilidad Unidad Central de Procesamiento Cantón Móvil.....</i>                        | <i>105</i> |
| <i>Tabla 29: Mantenibilidad Unidad Central de Procesamiento Cantón Móvil.....</i>                    | <i>105</i> |
| <i>Tabla 30: Disponibilidad Unidad Central de Procesamiento Cantón Móvil.....</i>                    | <i>106</i> |
| <i>Tabla 31: Listado de Material Sistema de Bloqueo Móvil por Radio Cantón Móvil.....</i>            | <i>107</i> |



|  |            |
|--|------------|
| <i>Tabla 32: Fiabilidad Sistema de Bloqueo Móvil por Radio Cantón Móvil .....</i>                    | <i>108</i> |
| <i>Tabla 33: Mantenibilidad Sistema de Bloqueo Móvil por Radio Cantón Móvil.....</i>                 | <i>108</i> |
| <i>Tabla 34: Disponibilidad Sistema de Bloqueo Móvil por Radio Cantón Móvil .....</i>                | <i>109</i> |
| <i>Tabla 35: Listado de Material Sistema Señalización Embarcado Material Móvil Cantón Móvil.....</i> | <i>110</i> |
| <i>Tabla 36: Fiabilidad Sistema de Señalización Embarcado Material Móvil Cantón Móvil.....</i>       | <i>110</i> |
| <i>Tabla 37: Mantenibilidad Sistema de Señalización Embarcado Material Móvil Cantón Móvil.....</i>   | <i>111</i> |
| <i>Tabla 38: Disponibilidad Sistema de Señalización Embarcado Material Móvil Cantón Móvil.....</i>   | <i>112</i> |
| <i>Tabla 39: Coste del Material Cantón Fijo.....</i>   | <i>113</i> |
| <i>Tabla 40: Costes de Ejecución: desarrollo, pruebas y puesta en servicio Cantón Fijo .....</i>     | <i>115</i> |
| <i>Tabla 41: Coste de Mantenimiento Cantón Fijo.....</i>   | <i>115</i> |
| <i>Tabla 42: Coste Total Cantón Fijo .....</i>   | <i>115</i> |
| <i>Tabla 43: Coste del Material Cantón Móvil.....</i>  | <i>117</i> |
| <i>Tabla 44: Coste de Ejecución: desarrollo, pruebas y puesta en servicio Cantón Móvil .....</i>     | <i>119</i> |
| <i>Tabla 45: Coste de Mantenimiento Cantón Móvil.....</i>  | <i>119</i> |
| <i>Tabla 46: Coste Total Cantón Móvil.....</i>   | <i>119</i> |
| <i>Tabla 47: Tiempos de Recorrido Sección 1.....</i>   | <i>121</i> |
| <i>Tabla 48: Tiempos de Recorrido Sección 3.....</i>   | <i>121</i> |
| <i>Tabla 49: Tiempo entre Trenes por Tramo Cantón Fijo.....</i>                                      | <i>124</i> |
| <i>Tabla 50: Tiempo entre Trenes Cantón Fijo .....</i>   | <i>124</i> |
| <i>Tabla 51: Tiempo entre Trenes por Tramo Cantón Móvil.....</i>                                     | <i>127</i> |
| <i>Tabla 52: Tiempo entre Trenes Cantón Móvil.....</i>   | <i>128</i> |
| <i>Tabla 53: Demanda de Pasajeros por año .....</i>  | <i>136</i> |



# 1 CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

## 1.1 Motivación del Proyecto

Una de las preocupaciones más significativas de los habitantes de las ciudades contemporáneas es el tiempo invertido en los desplazamientos que se realizan en el entorno urbano, así como la preocupación sobre la calidad de vida a alcanzar en ellas, basada en consideraciones medioambientales y de seguridad.

Estas preocupaciones nacen de la alta concentración de población en las ciudades tal y como reflejan los datos actuales de la distribución de la población en el mundo suministrados anualmente por la Comisión Europea:

| Comparison EU-28 – World<br>GENERAL DATA          |               |             |               |               |                |
|---|---------------|-------------|---------------|---------------|----------------|
|   | EU-28<br>2012 | USA<br>2012 | JAPAN<br>2012 | CHINA<br>2012 | RUSSIA<br>2012 |
| Population<br>million                             | 506.65        | 313.91      | 127.56        | 1350.70       | 143.53         |
| Population growth<br>% change since previous year | 0.1           | 0.7         | -0.2          | 0.5           | 0.4            |
| Urban population<br>% of total                    | 74            | 83          | 92            | 52            | 74             |
| Area<br>1 000 km <sup>2</sup>                     | 4414          | 9629        | 378           | 9597          | 17075          |
| Population density<br>Persons/km <sup>2</sup>     | 115           | 33          | 338           | 141           | 8              |
| GDP (nominal)<br>billion EUR                      | 12971         | 12644       | 4623          | 6378          | 1562           |
| Real GDP growth<br>%                              | -0.4          | 2.8         | 1.4           | 7.8           | 3.4            |
| Relative GDP per capita<br>in PPP (EU-28 = 100)   | 100           | 154         | 105           | 27            | 70             |
| Exports of goods<br>billion EUR                   | 1683          | 1215        | 604           | 1534          | 410            |
| Imports of goods<br>billion EUR                   | 1798          | 1792        | 646           | 1286          | 261            |

Ilustración 1: EU Transport in Figures 2014 - Comparación Población Mundial

El crecimiento de las ciudades ha venido determinado por el fácil acceso a servicios, infraestructuras y a oportunidades de empleo y estudios, siguiendo este crecimiento un modelo condicionado por el tipo de acceso de los habitantes al centro urbano; en el pasado, cuando el acceso de los habitantes sólo era posible a pie o a caballo, el crecimiento se realizaba en torno al centro urbano, y sin embargo, en la actualidad, al ser posible el desplazamiento a mayor distancia, se ha realizado un crecimiento menor en torno al centro, a favor de un crecimiento mayor en las zonas periféricas.



El hecho de que la población se distribuya mayoritariamente en el entorno urbano unido a que este crecimiento se realiza en la periferia, ha provocado un aumento de los vehículos a motor, siendo este tipo de transporte el más usado en la Unión Europea, con una clara diferencia con respecto al resto de tipos de transporte.

La curva de pasajeros transportados por automóviles ha ido creciendo año a año, sin embargo, en los últimos años puede observarse una tendencia a la disminución del número de pasajeros que utilizan como transporte tanto los autobuses como los automóviles.

Si bien esto puede deberse también a factores económicos, esta disminución unida a la curva incremental del número de pasajeros en transportes como el tren o el tranvía y el metro, indica un cambio de preferencia de la población europea en cuanto al tipo de transporte utilizado.

Esta misma tendencia puede también observarse en países como China y Japón, pero no en todas las partes del mundo; en Estados Unidos el uso del tren es minoritario, siendo aproximadamente su uso diez veces inferior al de la Unión Europea.

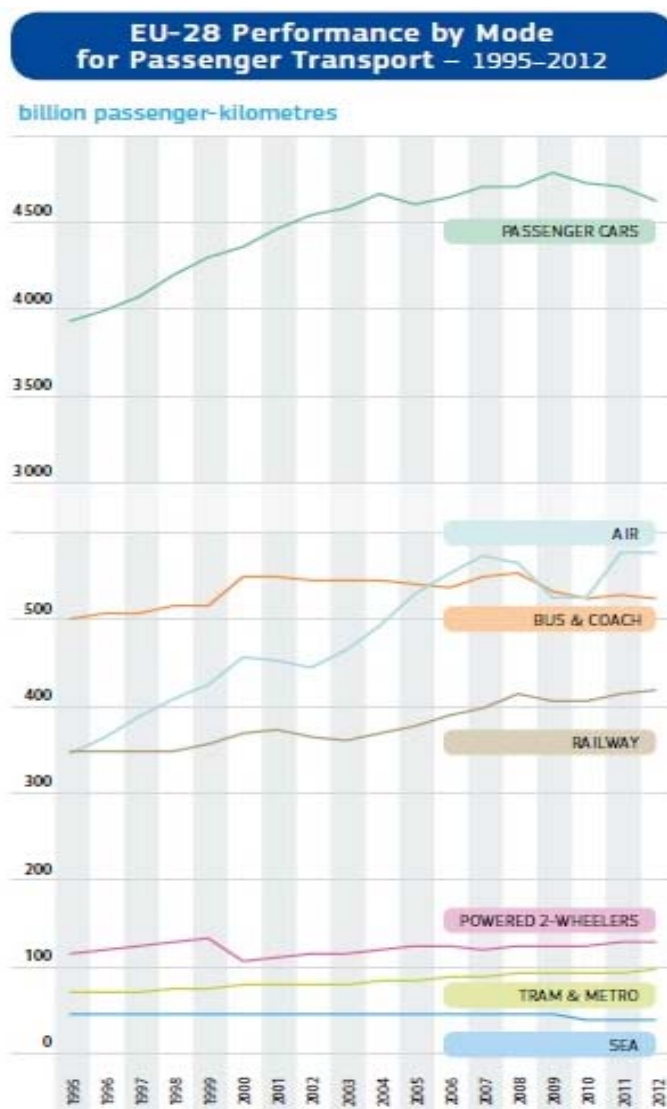


Ilustración 2: EU Transport in Figures 2014 – Comparación Tipo de Transporte de Pasajeros

El uso del automóvil como medio de transporte preferente provoca cifras negativas de congestión de tráfico, accidentes, calidad del aire, ruido y emisiones de CO<sub>2</sub> que obligan a tomar acciones para la mejora de la movilidad y sostenibilidad de las áreas urbanas, medidas que si bien en algunas ciudades han conseguido excelentes resultados a través de un sistema de transporte competitivo y eficiente, en muchas otras, todavía no han sido desarrollados o están en fase preliminar.

Una de las formas de poner en perspectiva los indicadores actuales es la cuantificación de estos factores en costes indirectos. De acuerdo a los estudios realizados como apoyo para el desarrollo de los planes de movilidad y sostenibilidad en las áreas urbanas por la Comisión Europea, estos factores pueden ser estimados en los siguientes costes indirectos:





Table 1-1 Estimated annual external costs of current transport system in EU27

| Indicator            | Estimate of current situation     | Estimated urban share |
|----------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| Congestion           | ~ EUR 130 billion                 | ~ EUR 80 billion      |
| Air quality          | ~ EUR 50 billion (road transport) | ~ EUR 20 billion      |
| Accidents            | ~ EUR 200 billion                 | ~EUR 80 billion       |
| Noise                | ~ EUR 40 billion                  | ~ EUR 40 billion      |
| CO <sub>2</sub>      |                                   | ~ EUR 7 billion       |
| Total external costs |                                   | ~ EUR 230 billion     |

*Ilustración 3: Study to Support an Urban Mobility Package 2013 - Costes Sistema de Transporte*

Con objeto de reducir estos factores, la Comisión Europea promueve el desarrollo de Planes Urbanos de Movilidad Sostenible a los que confiere una función estratégica y que son definidos tanto en el Plan de Acción de Movilidad Urbana de 2009 como en el Libro Blanco del Transporte de 2011, hoja de ruta hacia una política de transportes competitiva y sostenible. Existen adicionalmente distintas directivas de ámbito específico para el tratamiento de factores tales como la calidad del aire, emisiones de efecto invernadero, evaluación ambiental, ruido, suministro de energía y transporte.

Si bien no existe un Plan Urbano de Movilidad Sostenible perfecto, en los próximos años, las ciudades, definidas por la Comisión Europea como los núcleos con más de 100.000 habitantes, tendrán que implementar las medidas necesarias que garanticen la gestión eficiente del sistema de transporte, a fin de reducir el impacto de estos indicadores en la población y en el presupuesto de las ciudades.

Estos planes deberán considerar un plan integrado de transporte en las que sean implementadas las mejores y más innovadoras opciones, tras el correspondiente análisis de las distintas soluciones de transporte urbano, para la selección de la opción más efectiva y eficiente.

Actualmente, la Comisión Europea contribuye al impulso de desarrollos de Sistemas de Transporte Inteligentes (ITS), encaminados a la reducción de los costes de consumo de energía, reducción de eficiencia operacional, competitividad, seguridad y la consecución de un servicio de calidad.





Entre los más relevantes se encuentran nuevos diseños aerodinámicos, nuevos desarrollos de energía destinados a la reducción de la energía consumida mediante su reaprovechamiento, sistemas de asistencia a la conducción que ajustan la velocidad y aceleración/deceleración minimizando la energía necesaria para la circulación, nuevos diseños en ruedas y bogíes de trenes para la reducción del ruido externo, instalación de sistemas de emergencia en los vehículos para el envío de la localización del mismo en caso de accidente, nuevos sistemas de suministro de información a viajeros, etc.

En este contexto, nace el presente proyecto, con la motivación de contribuir a la selección de la mejor solución de transporte metropolitano.



## 1.2 Objetivos del Proyecto

Desde finales del siglo XIX, en que el primer metro del mundo subterráneo fue inaugurado en Londres, tras la brillante idea del ciudadano Charles Pearson, que persuadió a la Cámara de los Comunes de que la solución estaba en el subsuelo, la relación de ciudades en el que esta opción de transporte ha sido implantada ha ido creciendo, dando lugar a diferentes soluciones técnicas que satisfagan las necesidades de explotación.

El sistema de metro en la actualidad ha ido evolucionando debido a las necesidades a cubrir. En ciudades congestionadas, en las que el crecimiento todavía se produce en zonas cercanas al núcleo, la solución técnica impuesta debe ser capaz de transportar a un gran número de personas y con frecuencias muy altas. Sin embargo, en las ciudades con crecimiento en la periferia y en las que los cálculos predictivos del uso lo apoyen, la solución técnica impuesta no tendrá los mismos requisitos de capacidad y frecuencia.

La opción del transporte subterráneo, en el que el espacio utilizado no coincide con los vehículos motorizados, implica grandes gastos en infraestructura subterránea y en el desarrollo, implantación y mantenimiento de la solución de transporte propuesta. Por tanto, resulta fundamental el correcto análisis de las distintas soluciones dentro del correspondiente Plan Urbano de Movilidad Sostenible a definir en cada ciudad.

El objetivo principal y general de este proyecto es la de comparar las dos principales soluciones de transporte en los sistemas de metro actuales: Sistema de Señalización de Cantón Fijo y Sistema de Señalización de Cantón Móvil, con objeto de analizar sus principales ventajas y desventajas, no sólo en cuanto a la capacidad de la línea, sino en cuanto a la fiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad, y coste, para una mejor selección del Sistema de Señalización, en función de las necesidades y medios disponibles.

Para la consecución de este objetivo principal, se establecen otros objetivos específicos que son enumerados a continuación:

- Explicar el propósito y los componentes del Sistema de Señalización para una mejor comprensión de la función de cada uno de ellos en el funcionamiento global del sistema.
- Analizar las diferentes soluciones y arquitecturas para obtener una clara idea de qué resultado se obtendrá dependiendo de la selección realizada.
- Explicar las etapas de desarrollo, instalación y mantenimiento del sistema para la comprensión de las actividades a desarrollar una vez que éste ha sido seleccionado.
- Comparar las distintas soluciones mediante el cálculo de parámetros específicos que permitan analizar los resultados obtenidos y seleccionar la solución más óptima.
- Describir el método de selección del sistema de señalización en base a los parámetros específicos calculados.



## 1.3 Estructura del Proyecto

Para la consecución del objetivo principal y los diferentes objetivos específicos enumerados en el capítulo anterior, el proyecto ha sido estructurado en diferentes capítulos tal y cómo se describe a continuación:

### CAPÍTULO 2: SISTEMAS DE SEÑALIZACIÓN

En primer lugar se describirá la historia de la señalización ferroviaria y cómo la evolución de la tecnología ha ido dirigida a la solución de los problemas encontrados durante la explotación de las líneas de transporte ferroviario.

A continuación, se describirá el Sistema de Señalización, introduciendo en primer lugar el sistema, y en segundo lugar los distintos componentes que lo componen y su función principal en el conjunto. En base a los componentes definidos, se clasificarán los distintos tipos de sistemas de señalización.

### CAPÍTULO 3: EJECUCIÓN Y SELECCIÓN DEL SISTEMA DE SEÑALIZACIÓN

Una vez descritas las posibles soluciones de señalización, se detallarán las etapas necesarias para el desarrollo, instalación y mantenimiento de estas soluciones en una línea metropolitana.

Por último, se definirán los criterios de selección del sistema de señalización, definiendo los parámetros de capacidad, fiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad y coste.

### CAPÍTULO 4: MODELIZACIÓN DEL SISTEMA DE SEÑALIZACIÓN

A continuación, se detallarán las características de las principales soluciones de señalización empleadas en las líneas metropolitanas mediante la modelización del funcionamiento de las soluciones más empleadas: Cantón Fijo y Cantón Móvil.

### CAPÍTULO 5: CÁLCULO DE PARÁMETROS DEL SISTEMA DE SEÑALIZACIÓN

En el siguiente capítulo se realizará el cálculo de los parámetros que permitirán comparar los dos Sistemas de Señalización y que han sido modelizados en el capítulo anterior, tales como la fiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad, el coste y por último el tiempo de recorrido y la capacidad, mediante la simulación ambas soluciones.

### CAPÍTULO 6 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En el siguiente capítulo, se realizará un análisis de los resultados obtenidos en el capítulo anterior, y se estudiará la influencia de cada uno de los parámetros en la selección del Sistema de Señalización.

El capítulo finalizará con la descripción del método a seguir para la elección del sistema de señalización en función de las necesidades de explotación de la línea y los recursos disponibles.



## CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE TRABAJO DERIVADAS DEL ANÁLISIS

En el capítulo final, se desarrollarán las conclusiones alcanzadas tras el análisis de los resultados obtenidos durante la comparación de los dos tipos de soluciones de señalización y se propondrán futuras líneas de trabajo.



## 2 CAPÍTULO 2: SISTEMAS DE SEÑALIZACIÓN

### 2.1 Historia de los sistemas de señalización y su evolución

El nacimiento de los sistemas de señalización y su evolución tiene como propósito conseguir una explotación ferroviaria más eficiente y segura. Este desarrollo ha llevado asociado la aparición de ciertos problemas y retos que se han ido solucionando a lo largo de la historia.

El capítulo que se desarrolla a continuación tratará de esos retos y de cómo la evolución de la tecnología en los sistemas de señalización ha tratado de solucionarlos.




#### 2.1.1 Primeros Sistemas de Señalización

En las primeras explotaciones ferroviarias, no existían problemas de circulación ya que el número de trenes disponible era muy escaso. Los trenes salían una vez que estaban preparados y el movimiento de los trenes se realizaba a la información visual que recibía el maquinista.

Con el aumento del tráfico ferroviario y la necesidad de ampliar la capacidad de las líneas (poner más trenes en circulación), aparece el primer problema: el maquinista se ve sometido a un ejercicio constante de regulación de velocidad del tren, en función de la situación del resto de trenes.

Este sistema que resultaba eficiente, mientras que las velocidades eran bajas, resultó ineficiente en cuanto los trenes alcanzaron mayores velocidades ya que la distancia a la que el maquinista es capaz de ver el tren, resultó menor que la distancia necesaria para frenar. Nace así, el primer sistema de señalización que consistió en la participación de los denominados guardavías, personal ferroviario que se situaba en puntos elevados, cuya labor consistía en conocer la localización de los trenes para la autorización de paso del tren siguiente.

En 1820, nace la primera señal en forma de bandera, como apoyo a la labor del personal ferroviario o guardavías heredado de la operación marítima.

| DÍA   |   | NOCHE  |
|---|---|--|
| BANDERIN  | BRAZOS  | LINTERNA   |
|  |  |  |
| (*)   | (**)  |  |
| A   | B   | C  |

(\*) Aunque el banderín esté caído en tierra.

(\*\*) Sólo a falta de banderín o linterna.

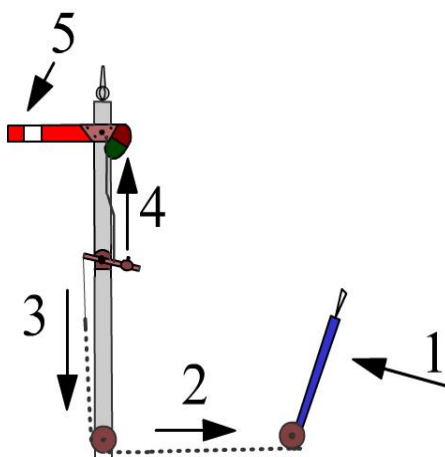
*Ilustración 4: Primer Sistema de Señales - Banderas*



De nuevo, con la extensión de las líneas ferroviarias y los problemas derivados de la visibilidad, se hace inviable la posición del guardavía en cada punto donde un tren debe recibir la información. En 1840, las banderas son sustituidas por discos maniobrados en vía, “Disc and Crossbar”, y posteriormente por señales mecánicas a pie de vía.

La señal mecánica estaba constituida de un poste, dos poleas unidas por un cable y un contrapeso, de tal manera que la autorización de la marcha del tren se indica con el brazo en vertical y la parada del tren, con el brazo en posición horizontal, accionando el sistema de poleas.

Este sistema, con respecto al sistema de banderas, permitía a los trabajadores de los ferrocarriles, no tener que desplazarse hasta el punto donde el tren debía recibir la indicación de parada o vía libre, puesto que el brazo mecánico podía ser articulado de forma remota.



*Ilustración 5: Señales Mecánicas - Postes*

Sin embargo, tanto en el sistema de banderas, como en el sistema de señales mecánicas, en el momento en que se hacía de noche o las condiciones ambientales no eran favorables, se hacía necesario iluminar las señales con un farol. De esta manera, se resolvió unir el punto de luz a la señal mecánica y nacen las primeras señales luminosas.

El primer semáforo apareció en 1842 en el ferrocarril de Croydon, Inglaterra y consistía en un poste con el brazo mecánico equipado adicionalmente con cristales en los que se colocaba el farol de aceite. Las señales eran diseñadas por primera vez bajo una perspectiva de seguridad a través de contrapesos, ya que en caso de rotura, la acción de la gravedad bajaba el brazo colocándolo en su posición horizontal de parada.

Contemporáneamente al nacimiento de las primeras señales, nacen las primeras manivelas para accionar los desvíos, palanca que servía para cambiar la posición del desvío y así dirigirse de una vía a otra. De esta manera, el personal ferroviario, maniobra sobre el desvío y a continuación sobre la señal correspondiente autorizando al maquinista para continuar en el itinerario, apareciendo así el concepto de relación entre el aspecto de la señal y la posición de los desvíos.



La secuencia de operación para el movimiento de desvíos y señales se establecía de acuerdo a la programación horaria, y era pautada a través de un procedimiento, sin embargo, un error en la secuencia de operación, desembocaba en perturbaciones en la línea o incluso en colisión de trenes si un itinerario incompatible con otro era autorizado al mismo tiempo.

Un poco más tarde, en 1850, aparece la primera señalización en cabina en Inglaterra y los Estados Unidos, mediante contactos mecánicos entre los postes de las señales y las locomotoras a través de una señal acústica instalada en la vía. Posteriormente, la señal acústica fue instalada en la cabina, de tal manera, que se producía un “gong” en la cabina si la señal mostraba aspecto de parada.

### 2.1.2 Primeros Enclavamientos Mecánicos y Señalización en Cabina

En 1855, el sistema evoluciona hacía la obligación de impedir la autorización de itinerarios incompatibles con otros para trenes que, circulando en el mismo sentido, compartieran el mismo tramo de vía.

La idea que resuelve el problema se le ocurrió a un guardagujas de la estación de Batignolles de la Compañía del Oeste de Francia, llamado Vignier quien tuvo la idea de relacionar el aspecto de las señales con la posición de los desvíos de manera mecánica.

Lo realizó de una manera simple: intercalando entre las palancas del desvío pequeñas varillas de madera; éstas no podían moverse si las otras no estaban en la posición requerida, impidiendo así cambiar el estado de las señales relacionadas con los desvíos, si éstas no se encontraban en la posición requerida y conjugando así por primera vez el estado del desvío con el estado de la señal.

Este sistema fue a continuación sustituido por otro de triángulos metálicos, naciendo así, el primer enclavamiento, es decir, la relación de dependencia que existe entre la posición de los desvíos y el aspecto de las señales.

En 1880-1885, el sistema evoluciona de nuevo, a través del enclavamiento Bourè en la que se establece una relación entre cerraduras. Cuando la cerradura está cerrada, el mando del desvío se encuentra inmovilizado, y al accionar la llave fija, se libera una llave móvil que se utiliza para autorizar la correspondiente señal.



*Ilustración 6: Cerradura Bourè*





El sistema de señalización evoluciona y la velocidad de los trenes crece, por lo que se hace necesaria una mejora de la señalización en cabina. En 1872, se creó en Francia el "Crocodile", como evolución al sistema tradicional de señalización en cabina. El sistema "Crocodile", se basa en la repetición de las señales laterales y debe su nombre a la forma del dispositivo colocado en los carriles que se utilizaba para obtener contacto galvánico y transmitir la información a la locomotora y por tanto, al maquinista.

En 1891, la ley inglesa obliga a la instalación de enclavamientos Bourè en todos los desvíos, y surgen los primeros enclavamientos mecánicos centralizados uniendo en un mismo lugar a través de un sistema de palancas, no sólo la relación de dependencia que existe entre la posición de los desvíos y las señales, sino la relación de dependencia que existe entre los correspondientes itinerarios, impidiendo el establecimiento de itinerarios incompatibles.

El sistema funciona a través de un conjunto de palancas verticales (palancas de señales y desvíos) y horizontales (manetas de itinerarios) sobre las que se acciona imposibilitando la colisión entre trenes.

A finales del siglo XIX y surgen enclavamientos mecánicos centralizados de distintos tipos: Scheid-Bachmann, Mackencia, Henning, Siemens de transmisión funicular por cable de acero, de transmisión hidráulica o de transmisión hidroneumática.



*Ilustración 7: Enclavamiento Mecánico de Palancas*

### 2.1.3 Diagramas de Tiempo – Bloqueo Fijo

Sin embargo, aunque estos primeros enclavamientos centralizan ciertas relaciones de dependencia necesarias para el movimiento seguro de trenes y es un primer acercamiento al sistema centralizado de control local, existía otra relación fundamental que aún seguía realizándose de manera tradicional: el avistamiento de los trenes precedentes para autorizar la salida del siguiente de una estación.



Esto trata de ser paliado con una planificación horaria de los trenes, de tal manera que se autoriza la salida de un tren de una estación a otra y se aplica un margen de tiempo para prevenir posibles retrasos o imprevistos, pero el sistema resulta insuficiente en caso de que la locomotora, no muy fiable por entonces, sufra algún percance en el trayecto.

Adicionalmente, cuando aumentó la demanda de viajes, se hizo necesario hacer circular dos trenes en sentido contrario y por la misma vía. Para evitar la colisión frontal de trenes, se definieron unos diagramas de tiempo que se comunicaban al maquinista para que se detuviera en el correspondiente cruce hasta que el tren en sentido contrario cruzara la vía. Sin embargo, el problema aparece de nuevo cuando el tren que circulaba en sentido contrario no llegaba al cruce y el personal ferroviario del tren detenido en el cruce caminaba en busca del tren contrario hasta hacerlo detenerse y se redefinía el punto más cercano en donde finalmente el cruce iba a producirse.

El siguiente paso fue la entrega de un testigo, que era único por itinerario por lo que ningún tren era autorizado a circular si en la estación no se le había entregado el testigo, puesto que ello implicaba que el testigo se encontraba en posesión de un tren en sentido contrario. Nace aquí el concepto de bloqueo, puesto que la vía se encuentra “bloqueada” para el uso por un tren, evitando que un segundo tren pueda invadirlo mientras el primero no haya abandonado ese tramo de vía.

Tanto el sistema de diagramas de tiempo como el sistema del testigo son seguros, pero provocan grandes retrasos ya que no son sistemas flexibles que puedan ser modificados en caso de imprevistos y no permiten al sistema ferroviario ser un sistema fiable.

#### 2.1.4 Bloqueo Telegráfico y Telefónico

El invento del telégrafo y los mensajes en código Morse permitieron la comunicación entre estaciones a través de sonidos codificados de una manera más dinámica. Éste fue utilizado por primera vez por Charles Minot superintendente del Eire Railway en Estados Unidos, que por primera vez utilizó la comunicación a través del telégrafo para ir impidiendo el movimiento de trenes en sentido contrario que por imprevistos, no habían llegado a su destino y disponer de vía libre para el tren que él mismo conducía.

Así, utilizando este procedimiento, entre dos estaciones, se establecía un mecanismo de petición y autorización entre los Jefes de las Estaciones adyacentes. Para asegurarse de que todo el tren había llegado completo al destino, se hizo necesario situar un farol rojo en el último vagón, que permitía verificar que todo el tren había llegado a la estación de destino.

Posteriormente, este sistema se completó con el bloqueo eléctrico tipo galvanométrico y a continuación, fue sustituido por el teléfono en la segunda década del siglo XIX ya que superaba al sistema anterior, al no requerir conocimiento del código Morse, a la vez que aumentaba la velocidad de comunicación, al no requerirse la escritura manual de los mensajes.

Basado en este sistema nace el bloqueo eléctrico manual, aplicando el mismo procedimiento que se había utilizado con el telégrafo o el teléfono, pero en el cual el mecanismo de petición y autorización entre los Jefes de las Estaciones adyacentes, se realizaba eléctricamente basado en relés de seguridad.



Estos sistemas, supusieron un gran avance en el sistema de seguridad aplicado, pero se requería todavía la confirmación de la salida y la llegada del tren en ambas estaciones.

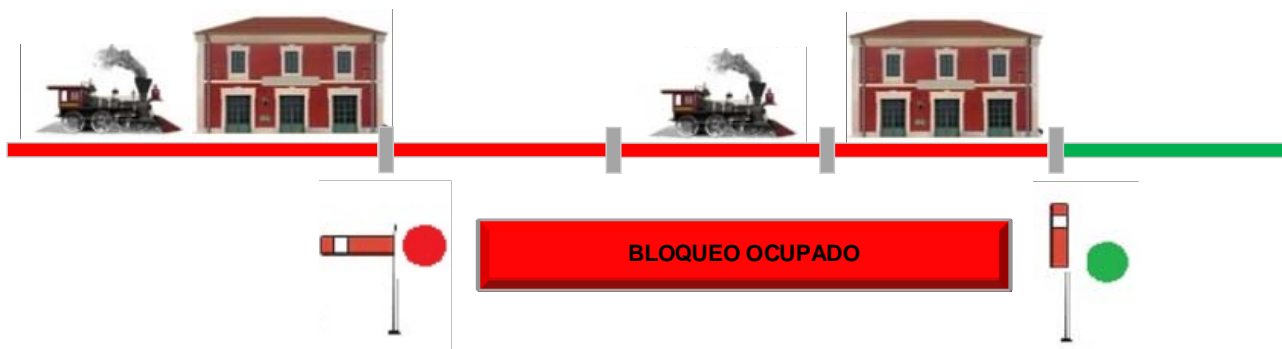
### 2.1.5 Bloqueo Automático

A principios del siglo XX, los carriles comienzan a considerarse parte de un circuito eléctrico y nacen los primeros circuitos de vía, en la que los ejes del tren producen el cortocircuito de la corriente que provoca la caída de un relé y detecta el estado de ocupación del correspondiente circuito de vía.

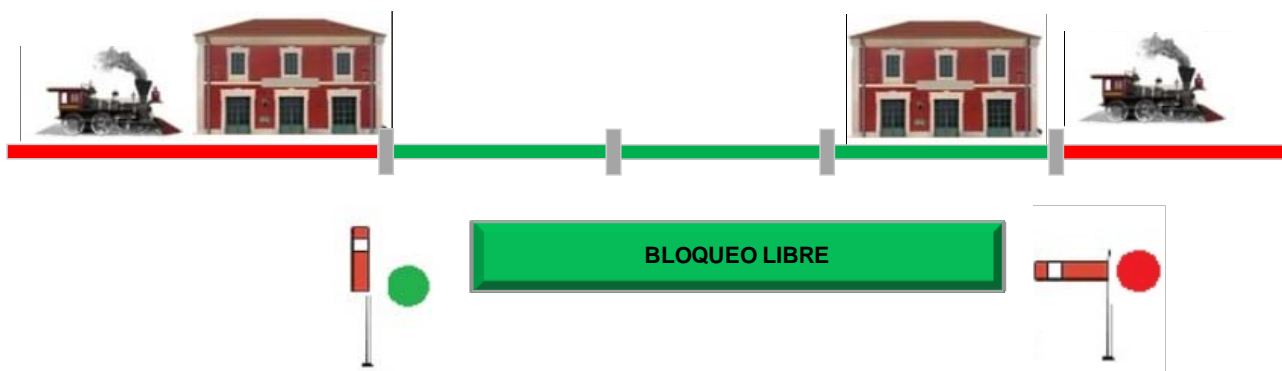
El sistema fue utilizado por primera vez en Estados Unidos e importado por Metro de Londres en 1903 para su aplicación en la línea District.

El trayecto entre estaciones se divide por primera vez en cantones donde cada cantón se encuentra protegido por una señal. El brazo mecánico de la señal se acciona a partir de la información recibida desde los circuitos de vía y la seguridad queda garantizada gracias a esta relación, apareciendo así el bloqueo automático.

El bloqueo automático supone un gran avance en los sistemas de señalización, puesto que por primera vez, se dispone de un sistema para autorizar y regular de manera segura el tráfico ferroviario entre estaciones adyacentes.



*Ilustración 8: Bloqueo Automático Ocupado - Tren Precedente en Estación*



*Ilustración 9: Bloqueo Automático Libre - Tren Precedente abandona Estación*



### 2.1.6 Sistema de Protección Automático de Tren

En conjunción con el uso de los primeros bloqueos automáticos aparecen los primeros sistemas mecánicos de parada de tren. En 1901, se desarrolla el primer “train stop” para la ciudad de Boston y posteriormente el sistema entra en uso en el Metro de Nueva York y en Metro de Londres. Estos sistemas eran dispositivos mecánicos de parada de tren situados a pie de señal y que tenían por principal función evitar que un tren rebasara una señal en rojo en caso de error del maquinista, activando directamente el freno del tren. Sin embargo, estos sistemas mecánicos no siempre funcionaban óptimamente puesto que el brazo mecánico de retención se ve afectado por las condiciones ambientales, ya que tanto la nieve como el hielo pueden impedir su correcto funcionamiento.

A principios del siglo XX, los sistemas mecánicos de parada de tren evolucionan a sistemas de protección de tren situados en cabina, en los que a diferencia de los sistemas mecánicos de parada, que actuaban directamente sobre el freno, se supervisa la velocidad del tren con el fin de garantizar una parada progresiva sin rebasar la señal en rojo.

El 1906, se empieza a utilizar a gran escala el sistema ATC (Automatic Train Control), de la compañía británica GWR. El sistema ATC estaba basado en su precursor “Crocodile” pero será el primero que además de señalización en cabina, a través de una señal acústica, introduce el concepto de supervisión de la velocidad del tren actuando sobre el freno, en caso de ser necesario, lo que complementa el sistema de señalización lateral si el conductor fallara operando de acuerdo al aspecto de las señales.

Los sistemas de control de tren continuaron evolucionando y en 1920, se introdujo el sistema CCS (Continuous Cab Signals) en Pensilvania, basado en el contacto inductivo entre los circuitos cifrados en la vía y un receptor en la locomotora. Los circuitos de vía transmitían el estado de ocupación y esto hacía posible anunciar en la cabina el aspecto de la siguiente señal. En función de su aspecto, se actuaba igualmente sobre el freno del tren.

Contemporáneamente, en Alemania, Siemens desarrollaba el sistema Indusi, análogo al sistema CCS, pero con suministro de información puntual en las señales a través de circuitos magnéticos en la locomotora y en la señal pero que además incorporaba la supervisión de la línea de frenado. El sistema se erigió como el sistema más utilizado en Europa.

Esos sistemas suponen el nacimiento de los primeros sistemas automáticos de control de tren, sistemas ATP discretos, en los que la información acerca del estado de las señales por delante es suministrada en cabina y se actúa automáticamente sobre el tren lo que previene al tren de sobrepasar señales en rojo.

### 2.1.7 Enclavamiento Electrónico

Paralelamente, los enclavamientos siguieron evolucionando y se pasó de sistemas llamados de cableado libre a sistemas geográficos o de módulos, en las que el diseño del enclavamiento intentaba seguir la configuración geográfica del área a controlar.

En 1980, se desarrolla el primer enclavamiento electrónico, SSI desarrollado en Reino Unido por British Railway, basado en la técnica de los enclavamientos geográficos en los que la lógica del



enclavamiento trata de reproducir los módulos anteriormente desarrollados. A partir de ahí, su uso se generaliza en todas las empresas de señalización ferroviaria.

El uso de la electrónica en el enclavamiento hace posible el desarrollo del resto de componentes del sistema de señalización debido a la posibilidad de transmitir información en formato serie a puntos remotos, sin necesidad de utilizar hilos paralelos para el suministro de información; se instalan los primeros puestos de mando y regulación en forma de grandes pantallas de visualización para el control de un área extensa y la regulación horaria de los itinerarios de los trenes. Por primera vez, es posible obtener toda la información del estado de la vía (señales, desvíos, etc.) y la localización de todos los trenes de una línea, en un solo punto lo que racionaliza la explotación ferroviaria evolucionando los sistemas de regulación del tráfico y el suministro de información a los viajeros.

#### 2.1.8 Sistemas ATP Puntuales y Continuos

En cuanto a los sistemas de protección de tren, éstos evolucionan especialmente en el ámbito de los trenes metropolitanos a sistemas ATP puntuales más sofisticados empleado balizas y posteriormente a sistemas ATP continuos en los que la información es enviada al tren no sólo en puntos discretos, sino a lo largo de todo el recorrido, a través de lazos inductivos o circuitos de vía codificados, lo que permite al sistema adaptar la velocidad de manera inmediata a las condiciones de señalización, sin esperar a recibirla en los puntos definidos para ello.

La velocidad del tren es monitorizada de manera continua para prevenir que el tren circule a una velocidad excesiva y se adecue a las restricciones civiles de la vía y al aspecto de la señalización lateral. La velocidad máxima en cada tramo es mostrada en la cabina al maquinista y éste va adecuando la velocidad del tren a la misma, produciéndose una actuación automática sobre los frenos del tren, en caso de que la velocidad máxima sea rebasada.

#### 2.1.9 Operación Automática de Trenes

En 1961 y 1967 en la Línea 2 de Metro de Barcelona y en la Victoria Line de Metro de Londres, el sistema se complementa de nuevo, con el sistema ATO (Automatic Train Operation) que permite minimizar la intervención del maquinista. El sistema actúa en base a los cálculos realizados por el ATP y adecúa la velocidad del tren automáticamente produciendo no sólo la efectividad en el servicio sino una mejora en la eficiencia energética.

#### 2.1.10 Comunicación por Radio y Sistemas sin Conductor

Con el avance de la tecnología en la comunicación por radio, en 1990, se comienza a explorar las posibilidades de la comunicación radio para la aplicación en la comunicación vía – tren en los sistemas de señalización y en 2003 se inaugura el primer sistema de cantón móvil en el Aeropuerto de San Francisco. La posición del tren es reportada por el mismo tren y comunicada vía radio al sistema de vía. De esta manera, el sistema de vía actualiza continuamente la posición de los trenes y calcula dinámicamente la autoridad del tren hasta el obstáculo más próximo. Esto permite la circulación de trenes a la mínima distancia de acuerdo a la posición del siguiente tren y el término cantón pasa a ser el espacio comprendido entre dos trenes, en lugar del espacio comprendido entre dos señales naciendo así el cantón móvil.



Actualmente, el sistema evoluciona hacia los sistemas sin conductor, UTO (Unattended Train Operation) y en 2008 Nuremberg completó el primer proyecto de implantación y posteriormente, en 2011, París demostró que el sistema era viable en uno de los metros de mayor capacidad del mundo.

En la actualidad y debido a la posibilidad de sustituir los sistemas de señalización de cantón fijo por sistemas de señalización de cantón móvil sin grandes perturbaciones en el sistema de señalización actualmente en uso, un número significativo de ciudades con los metros más masificados del mundo han optado por implementar un sistema basado en cantón móvil siendo ejemplo ciudades como Madrid, Londres y París en Europa y Shenzhen y Tianjin en China.

## 2.2 Introducción al concepto de señalización

En el sector ferroviario, se denomina señalización a los distintos sistemas de control y protección de trenes. La señalización está compuesta por todos los elementos y materiales destinados a garantizar que el movimiento de los trenes se efectúe en las máximas condiciones de seguridad y eficiencia.

Con este fin, existe un sistema que controla la posición de los trenes, realiza una monitorización de los mismos en toda la línea, gestiona los distintos itinerarios y gobierna la posición de los desvíos y el aspecto de las señales.

La señalización, por tanto, tiene los siguientes principales objetivos:

- Proporcionar movimientos seguros a través de la línea ferroviaria, manteniendo distancias de seguridad entre trenes, sistemas de protección y resto de condicionantes de trazado y aparatos de vía. Para ello, es necesario monitorizar constantemente en qué sección de vía se encuentra un tren y a qué velocidad puede circular.
- Facilitar movimientos eficaces de los trenes y proporcionar suficiente capacidad de transporte. Para ello, el sistema de señalización debe adecuarse a las necesidades de la línea ferroviaria y determinar la distancia e intervalo mínimo que debe existir entre trenes, que define la capacidad de la línea.

En cuanto a la evolución del sistema, los sistemas de señalización pueden diferenciarse en los siguientes grandes tipos:

- Sistemas de Señalización Tradicionales
  - Posicionamiento de los trenes mediante Circuitos de Vía / Contadores de Ejes.
  - Control de la Marcha del Tren mediante Señalización Lateral Luminosa
  - Información al Maquinista sobre las condiciones de la vía en Señales Laterales





La señalización tradicional se fundamenta en un sistema de localización de tren basado en la instalación de circuitos de vía o contadores de ejes, que permiten localizar a los trenes en una determinada sección de vía. Esta localización de los trenes condiciona el aspecto de las señales, los aparatos de vía y los itinerarios permitidos. El maquinista controla manualmente la marcha del tren, de acuerdo al aspecto de la señalización lateral.

- Sistemas de Señalización Modernos
  - Posicionamiento de los trenes por radio
  - Control de la Marcha del Tren mediante Señalización en Cabina
  - Información al Maquinista sobre las condiciones de la vía en Cabina

La señalización moderna se fundamenta en un sistema de localización de tren basado en una comunicación radio y en el que el control de la marcha del tren se realiza a través del sistema de protección automático de tren embarcado. Este sistema embarcado, recibe la información de señalización desde la vía, la procesa y supervisa la marcha correcta del tren en función de la misma.

En función de cómo sea el suministro de información desde la vía al sistema embarcado y de la supervisión del tren que se realice, se establece la siguiente clasificación:

- Supervisión y suministro de información puntual: la supervisión de la velocidad del tren se realiza exclusivamente en los puntos de suministro de información.
- Supervisión continua y suministro de información puntual: la supervisión de la velocidad del tren se realiza de forma continua en función de la información recibida en el último punto de suministro.
- Señalización y suministro de información continuo: la supervisión de la velocidad del tren se realiza de forma continua en función de la información continua recibida.

Adicionalmente, el sistema de señalización debe garantizar la regulación del tráfico con una explotación eficiente y para ello, se instalan Sistemas de Control de Tráfico que, actuando sobre el sistema de señalización, permiten la eficiencia en la operación.

## 2.3 Descripción del Sistema de Control Ferroviario

El Sistema de Señalización está compuesto por un conjunto de equipamientos que cumplen con una reglamentación específica para garantizar la seguridad y eficacia del tráfico ferroviario y forman parte de la superestructura ferroviaria que se instala sobre la infraestructura ferroviaria de un sistema metropolitano.





La infraestructura ferroviaria es el terreno base sobre el que se asienta la vía y es también denominado explanación o plataforma. Está compuesto por los túneles, puentes, viaductos, pasos a distintos nivel y todos los elementos de contención y sistemas de canalizaciones para drenajes, saneamientos, etc.

Las características de la infraestructura limitan en gran medida las posibilidades del sistema de señalización por la gran influencia sobre parámetros fundamentales tales como la velocidad máxima, pero en cualquier caso, y aunque es obviamente un factor limitante, dependiendo del sistema de señalización de la superestructura ferroviaria a instalar, se obtendrá una mejor o peor eficiencia.

La superestructura ferroviaria está compuesta por la vía por la que circulan los trenes y el conjunto de equipamientos e instalaciones necesarias para garantizar el funcionamiento del sistema en condiciones de seguridad y eficiencia. Estos equipamientos pueden clasificarse en los siguientes grandes grupos:

- Sistema de Control Centralizado
- **Sistema de Señalización en Vía y Embarcado**
- Sistema de Energía
- Sistema de Comunicaciones Fijas y Móviles
- Material Móvil
- Sistema de Vía

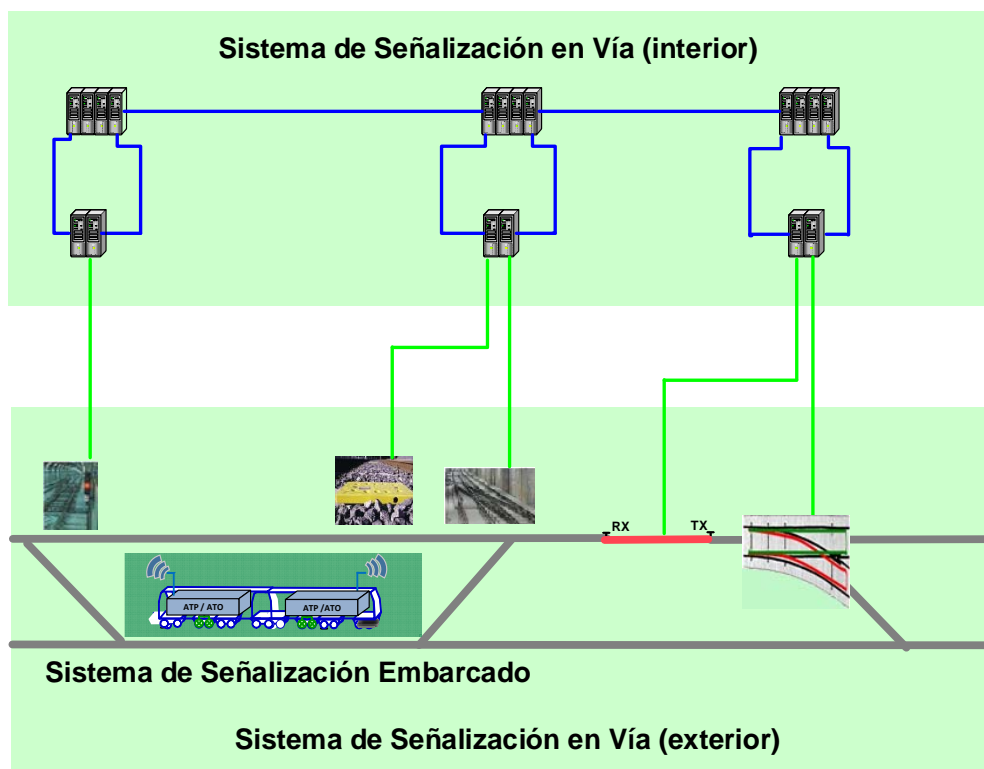


Ilustración 10: Diagrama Arquitectura de Señalización

## 2.4 Equipamientos del sistema de señalización

Los equipamientos del Sistema de Señalización se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- Sistemas de Señalización en Vía
  - Sistemas de Detección de tren: Circuitos de vía y Contadores de ejes
  - Aparatos de Vía: Desvíos, Escapes y Travesías
  - Señales Luminosas (Lámparas/ Leds)
  - Sistemas de Transmisión: Balizas, Lazos, Circuitos de Vía Codificados y Sistema de Radio
  - Sistema de Control y Supervisión de los Elementos de Vía (Enclavamiento)
  - Sistema de Bloqueo Móvil por Radio
- Sistemas de Señalización Embarcado en Material Móvil
  - ATP – Sistema de Protección Automática de Tren
  - ATO – Sistema de Operación Automática de Tren

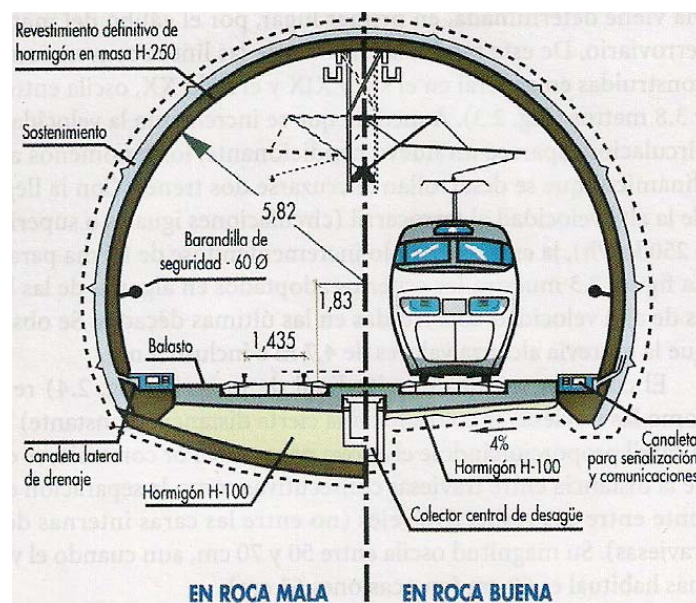


*Ilustración 11: Equipamiento Sistema Señalización*

### 2.4.1 Sistemas de Señalización en Vía

El equipamiento del Sistema de Señalización en Vía se instala sobre la vía o en su proximidad. El Sistema de Vía está compuesto por el conjunto carril, traviesa y sistema de sujeción que se apoya en un lecho elástico, constituido por el balastro y la plataforma.

En la figura, se muestra la sección transversal del Sistema de Vía en su configuración para túnel:

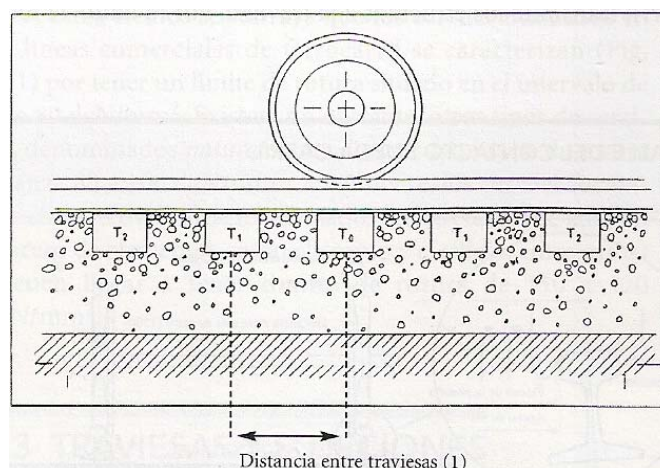


**Ilustración 12: Sección Sistema de Vía**

El carril es el elemento principal del Sistema de Vía y está compuesto por una barra de acero cuya función básica es la sustentación y el guiado de los trenes. En él se distinguen tres partes: la parte superior llamada *cabeza* que se utiliza como elemento de rodadura; el *patín* que representa la base del carril y sirve para su sujeción a las traviesas; y el *alma* que es la parte delgada que une la cabeza y el patín. Los carriles se sueldan unos a otros en sus extremos constituyendo una única barra soldada. Para compensar los efectos de la dilatación se instalan juntas de dilatación.

La disposición de los dos carriles que conforman una vía se denomina *ancho de vía* y se define como la distancia entre las caras internas de los dos carriles medida 14 mm por debajo de la superficie de rodadura del carril. El ancho de vía más habitual en los trenes metropolitanos (Metro Nueva York, Metro de París, etc.) es el conocido como ancho de vía europeo, que se corresponde con 1435 mm aunque existen excepciones como es el caso de Metro de Madrid cuya ancho de vía es de 1445 mm.

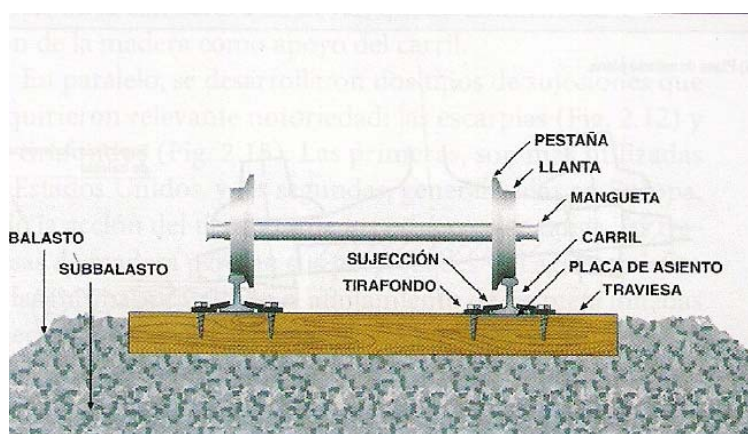
Las traviesas sirven de sostenimiento al carril constituyendo el nexo de unión entre éste y el balastro y se sitúan en dirección transversal al eje de la vía a una distancia constante unas de otras. Las traviesas son unidas al carril a través de los tirafondos y las placas de asiento y pueden ser de diversos materiales: madera, hormigón armado, etc.



**Ilustración 13: Distancia entre Traviesas**

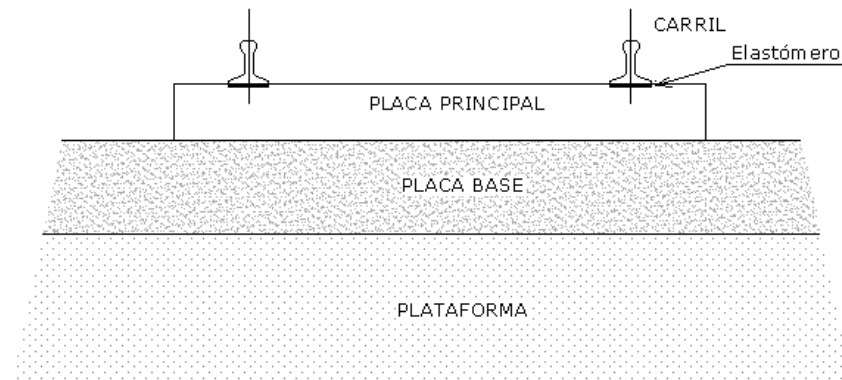
El balastro es un elemento granular de silicio sobre el que se asientan las traviesas, cuya función es amortiguar y repartir los esfuerzos que ejercen los trenes sobre la vía, impedir el desplazamiento de ésta y proteger la plataforma.

El carril se apoya en la traviesa y ésta se encuentra apoyada en la capa de balastro. La inclinación de la capa de balastro (4%) en contacto con la plataforma permite evacuar el agua de lluvia hacia las cunetas de desagüe, evitando o reduciendo su efecto sobre la infraestructura.



**Ilustración 14: Conjunto Carril - Traviesa - Balastro**

Actualmente y en especial en sistemas metropolitanos, se opta por la sustitución del balastro por el sistema *vía en placa* consistente en la instalación de *placas base* de un material más rígido: hormigón o asfalto. Sobre la placa base, se instala la *placa principal* que soporta los carriles gracias a un elastómero y que se fija a ella de forma directa o de forma indirecta a través de los elementos de sujeción que pueden ser: bloques, traviesas o losas.



*Ilustración 15: Estructura de la Vía en Placa*

En el caso de las traviesas, éstas pueden incorporarse hormigonando la placa una vez colocadas las traviesas, por lo que al producirse el fraguado del hormigón, se genera un bloque monolítico o introduciendo algún elemento elástico entre la placa principal y las traviesas que soportan el carril.

En general los distintos diseños de vía en placa permiten:

- Reducción de ruidos y vibraciones y mejora en estabilidad y confort
- Posibilidad de circulación de vehículos de transporte sobre la plataforma ferroviaria
- Larga vida útil y minimización de las operaciones de mantenimiento
- Base para trazados de vía óptimos porque posibilita trazados más rectos
- Reducción del coste de la infraestructura requerida: aligeramiento de viaductos, reducción de la sección el túneles etc.
- Disminución de la dependencia de disponibilidad de balastro y su transporte al interior de las ciudades



*Ilustración 16: Vía en Placa de Hormigón*





En los siguientes apartados se describirán los distintos equipamientos que se instalarán sobre el Sistema de Vía o en su proximidad.

#### 2.4.1.1 Equipamiento de Vía: Sistemas de Detección de Tren

Los Sistemas de Detección de tren determinan la posición del tren en base a la ocupación física del carril.

Para la detección del tren, el carril es dividido en secciones y en cada una de esas secciones, se instala una unidad de detección, lo que permite localizar el tren a lo largo de todo el trazado a señalizar. La longitud de esas secciones de vía depende del sistema de señalización aplicado según el tipo de explotación a realizar.

El sistema de detección será el responsable de informar al Sistemas de Control y Supervisión de los Elementos de Vía del estado de ocupación en el que se encuentra cada una de las secciones en cada momento, siendo las informaciones enviadas:

- Ocupado
- Libre
- Avería

Los Sistemas de Detección se clasifican en los siguientes grupos:

- Circuitos de vía: con o sin juntas inductivas
- Contadores de ejes

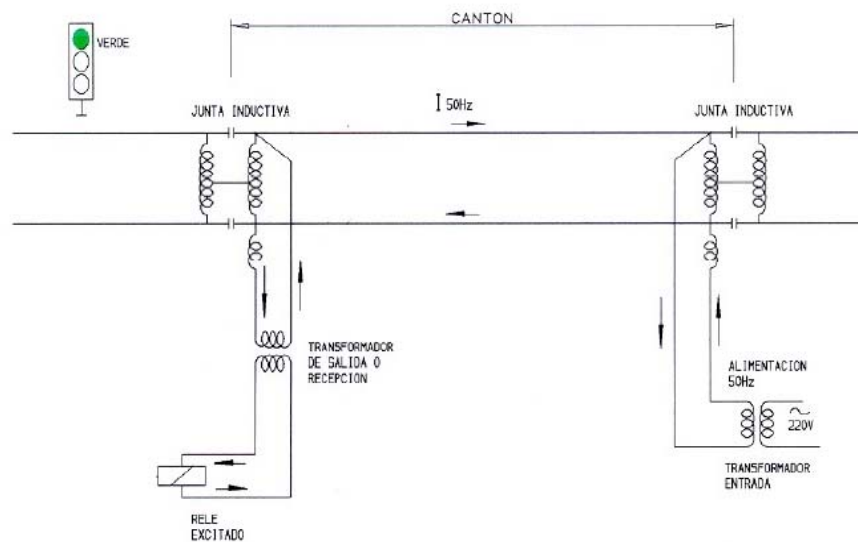
##### 2.4.1.1.1 Circuito de Vía con Juntas Inductivas

El circuito de vía está formado por un circuito eléctrico que excita, en la situación de circuito de vía libre, a un relé que informa de que esa sección de vía está libre.

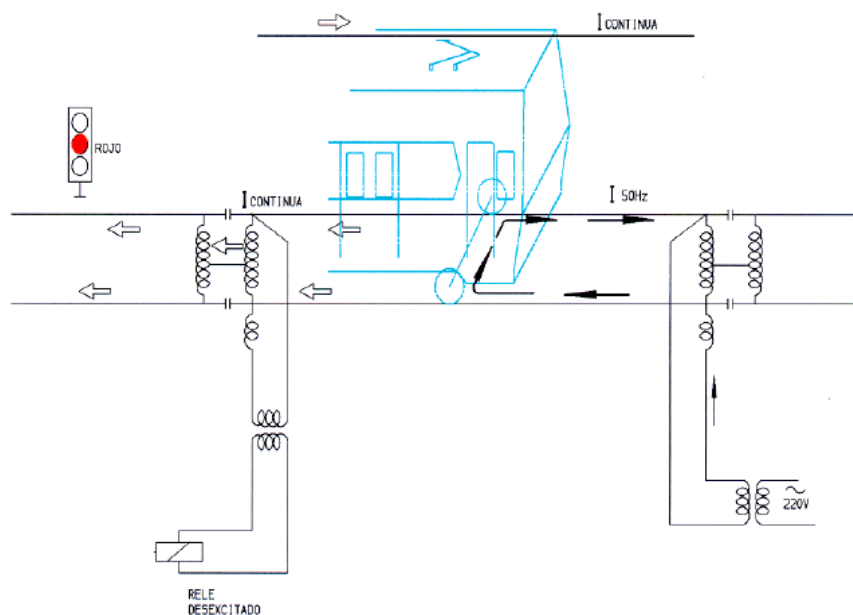
Cuando un tren entra en dicha sección de vía, cortocircuita con su primer eje el circuito eléctrico encontrándose la corriente un camino con menor impedancia des-excitando el relé e informando de que esa sección de vía está ocupada.

En las líneas con tracción eléctrica, uno o varios carriles se utilizan para transportar la corriente de retorno. La existencia de la corriente de señalización y el retorno negativo de la corriente continua de la tracción eléctrica, supone la coexistencia de dos corrientes con distinto destino: la corriente alterna de señalización debe circunscribir su recorrido a la sección de vía y la corriente continua de tracción, retornar a la subestación.

El circuito de vía con juntas basa su funcionamiento en la inyección de una corriente alterna de señalización que gracias a las juntas aislantes, queda circunscrita a la sección de vía permitiendo al mismo tiempo el paso de la corriente continua.



*Ilustración 17: Circuito de vía Libre*



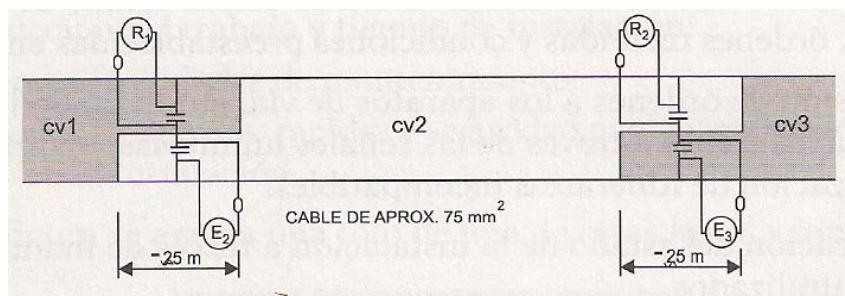
*Ilustración 18: Circuito de vía Ocupado*

#### 2.4.1.1.2 Circuito de Vía sin Juntas Inductivas

El circuito de vía sin juntas basa su funcionamiento en la inyección de una audiofrecuencia codificada que nace del emisor y circula sobre la inductancia del carril y que al llegar al final de la sección, es decodificada por un receptor, que a su vez descarta cualquier otra frecuencia que pudiera estar presente, caracterizando así esa sección de vía.



En la ilustración adjunta puede observarse como los emisores (E2 y E3) y los receptores (R1 y R2) realizan la misma función que el transformador receptor del circuito de vía con juntas, de tal manera que el circuito de vía se considera libre si el receptor recibe la frecuencia esperada desde el emisor, lo que no ocurre en el caso de que el tren se encuentre dentro de la sección de vía.



*Ilustración 19: Circuito de Vía Sin Juntas*

La separación entre circuitos contiguos se realiza electrónicamente creando zonas de sintonía. Estas zonas de sintonía se consiguen con la utilización de condensadores acoplados a la inductancia propia de los carriles para crear zonas de resonancia a la frecuencia portadora del circuito, lo que crea una zona de cortocircuito que permite separar las secciones de vía.

Entre las principales ventajas de los circuitos de vía sin juntas, se destacan las siguientes:

- Mayor inmunidad del circuito respecto a los armónicos de las corrientes de tracción
- Reducción del equipamiento de vía al eliminar las juntas inductivas
- Reducción del mantenimiento al encontrarse el emisor y el receptor en un bastidor de circuitos de vía localizado en la caseta técnica en lugar de en la vía



*Ilustración 20: Bastidor de Circuitos de Vía*

Este tipo de circuitos de vía es el más utilizado en sistemas ferroviarios metropolitanos en los que como veremos en capítulos posteriores, el número de secciones de vía que se instalan es superior al instalado en sistemas de señalización convencionales por lo que la eliminación de las juntas impacta de mayor manera en los costes de instalación y mantenimiento.

### 2.4.1.1.3 Contadores de Ejes

Está constituido por uno o varios dispositivos de detección de ruedas acoplados a un dispositivo lógico denominado evaluador, que realiza el recuento de los ejes que pasan por un punto determinado.

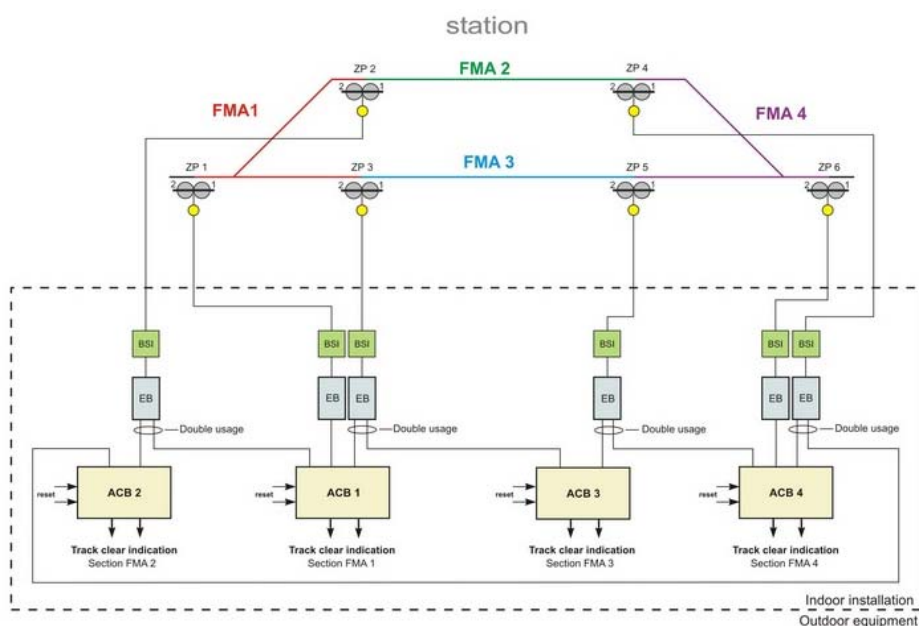
El sistema de detección de ruedas está constituido por sensores situados en la vía que detectan la presencia el paso de la rueda del tren. Estos se instalan en el lado interior de los carriles a través de una garra al pie del carril, no siendo necesario perforarlo. Estos sensores informan de la existencia de un tren al evaluador que suministra corriente a los sensores de ruedas, evalúa las señales recibidas y calcula el estado de ocupación de la sección de vía.



*Ilustración 21: Sensor de Rueda*

Para detectar la ocupación de una sección de vía, el sistema compara el número de ejes que entran en la sección con el número de ejes que salen. A diferencia del circuito de vía, es capaz de distinguir el sentido de circulación del tren.

El sistema dará por ocupada una sección de vía cuando el número de ejes contados por el sensor de rueda de entrada y el sensor de rueda de salida sean diferentes y lo dará por libre cuando sean iguales.



*Ilustración 22: Sistema Contador de Ejes*



Entre las principales ventajas/inconvenientes de los contadores de ejes con respecto a los circuitos de vía se destacan las siguientes:

- Independencia de las características de la vía y de las condiciones ambientales
- No existen limitaciones de longitud como en el caso de los circuitos de vía.
- Ante pérdida de la alimentación, interferencias, error en la cuenta, etc. es necesaria la normalización del equipo contadores de ejes en el caso de que éste se encuentre ocupado lo que implica el paso de un tren sobre él para la puesta a cero de la cuenta.

#### 2.4.1.2 Equipamiento de Vía: Aparatos de Vía

Los Aparatos de Vía son los elementos del Sistema de Señalización que permiten que los trenes puedan pasar de una vía a otra sin perder la continuidad del guiado. En función de la posición en la que se encuentren, determinarán la dirección que seguirá el tren.

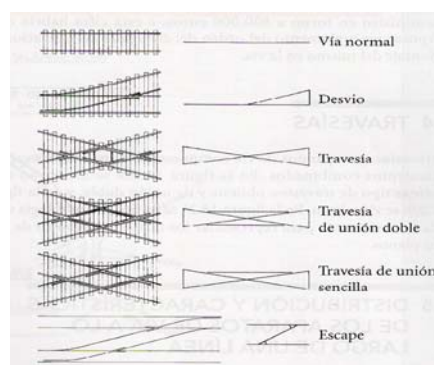
Para la instalación de los distintos aparatos de vía y de sus características técnicas, se realiza un estudio de la operación a realizar en la línea considerando dónde el desdoblamiento de la vía resulta óptimo por motivos tales como: posibilidad del cambio de dirección en determinados puntos, creación de vías de apartadero, posibilidad de vueltas al final de una línea, etc. Las características técnicas de los aparatos de vía dependerán fundamentalmente de la velocidad a la que el aparato va a ser circulado.

El aparato de vía será responsable de informar al Sistemas de Control y Supervisión de los Elementos de Vía de su posición en cada momento, siendo las informaciones enviadas:

- Posición a Normal
- Posición a Invertida
- Sin Posición

Los aparatos de vía se clasifican en los siguientes grupos:

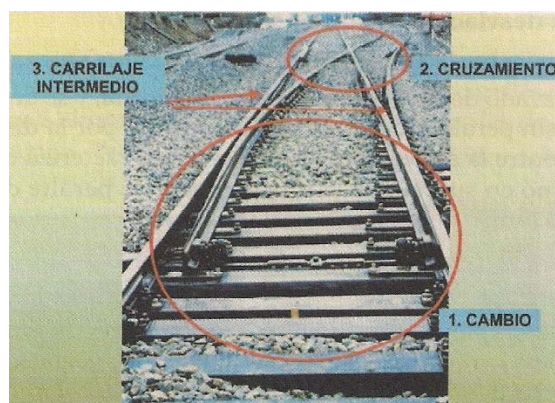
- Desvíos, que permiten el paso de una vía a otra con dos ejes tangenciales entre sí
- Travesías, que permiten el paso de una vía a través de otra cuyos ejes se cortan



**Ilustración 23: Tipos de Aparatos de Vía**

#### 2.4.1.2.1 Aparatos de Vía: Desvíos

El desvío está formado fundamentalmente por el *cambio* y el *cruzamiento*. En el cambio, los carriles se separan dos a dos y a través de los carriles intermedios, se conecta con el cruzamiento en el que se materializa el corte del carril derecho de vía directa con el izquierdo de la vía desviada:



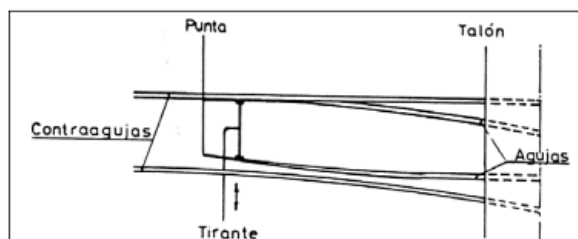
*Ilustración 24: Componentes del Desvío*

Al camino físico resultante de mayor velocidad se le denomina NORMAL o VÍA DIRECTA y al camino físico de menor velocidad se le denomina INVERTIDA o VIA DESVIADA.

El cambio es el elemento responsable de la determinación de la dirección que seguirá el tren y está compuesto de los siguientes elementos principales:

- Dos elementos móviles interiores denominados *agujas* que se deslizan sobre los *cojinetes del cambio* y que pueden accionarse mediante sistemas manuales, mecánicos, hidráulicos, neumáticos o eléctricos. Una vez fijas en una posición a través del *cerrojo de aguja/uña*, éstas guían la pestaña de la rueda del vehículo en su movimiento en una dirección u otra.
- Dos elementos fijos exteriores denominadas *contraagujas* que se encuentran apoyadas en los cojinetes del cambio y cuya forma permite el acoplamiento de las agujas.
- Uno o varios dispositivos de unión de las agujas denominados *tirantes* que garantizan el movimiento simultáneo de las agujas con un pequeño intervalo de tiempo.

El lado por donde se entra a la aguja se denomina *punta* y el extremo saliente y más próximo al cambio, *talón*.

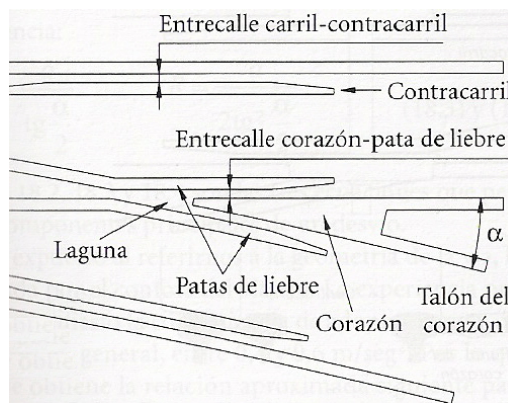


*Ilustración 25: Esquema del Desvío*



El cruzamiento es la parte donde se materializa el cruce de las vías y está compuesto de los siguientes elementos principales:

- Un corazón donde se produce el cruce de las vías y que presenta unas discontinuidades o huecos denominadas *lagunas* para permitir el paso de las pestañas de las ruedas.
- Dos patas de liebre que soportar el peso de las ruedas mientras éstas pasan por la laguna y posibilitar que la rueda siga apoyada.
- Dos contracarriles doblados hacia el interior y colocados frente a la laguna para asegurar el guiado doble de la rueda de un eje al paso de la otra por la laguna reteniendo las ruedas lateralmente y evitando el descarrilamiento y el deterioro de la punta del corazón.



**Ilustración 26: Esquema del Cruzamiento**

Para el paso a velocidades altas (mayores de 100 Km/h) por el cruzamiento, se vuelve necesaria la implantación de un cruzamiento de corazón móvil que elimina la laguna mediante un dispositivo adicional que actúa sobre la punta del corazón produciendo el desplazamiento del mismo hasta la pata de liebre.



**Ilustración 27: Cruzamiento Corazón Móvil**





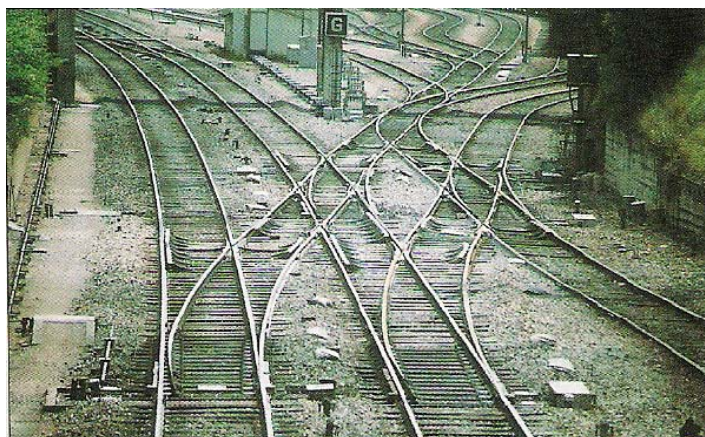
#### 2.4.1.2.2 Aparatos de Vía: Escape

El escape es la combinación de dos desvíos simples frecuentemente utilizada para la unión de dos vías que discurren paralelas.

Los escapes pueden ser simples denominados *diagonal* o cruzados denominados *bretelle* en función del número de desvíos utilizados posibilitando más o menos combinaciones de cambio de vía.

#### 2.4.1.2.3 Aparatos de Vía: Travesías

Las travesías son aparatos de vía compuestos en general por varios cruzamientos combinados y permiten el cruce al mismo nivel de dos vías cuyos ejes se cortan sin que el tren pueda cambiar su dirección



*Ilustración 28: Travesía*

#### 2.4.1.3 Equipamiento de Vía: Señales

Las Señales son los elementos del Sistema de Señalización que permiten regular la secuencia de los trenes que circulan por una línea ferroviaria. En función del aspecto que muestran, permiten o prohíben el paso de un tren desde ellas.

La distancia entre señales dentro de la línea ferroviaria dependerá de la velocidad, perfil de trayecto y potencia de freno de los distintos tipos de trenes. Las señales se sitúan normalmente a la derecha de la vía en el sentido de la marcha respetando el gálibo establecido.

La señal será responsable de informar al Sistema de Control y Supervisión de los Elementos de Vía del aspecto en el que se encuentra en cada momento, siendo las informaciones enviadas:

- Aspecto Permisivo
- Aspecto No Permisivo
- Avería



El tipo de señales, de Led o de Focos, empleadas en la señalización de una línea ferroviaria, así como el orden y color de los focos que componen las señales luminosas son definidas por el Reglamento de Circulación propiedad de cada Administración Ferroviaria.

#### 2.4.1.4 Equipamiento de Vía: Sistemas de Transmisión

##### 2.4.1.4.1 Balizas

Las balizas son los elementos del Sistema de Señalización que permiten el envío de datos estáticos relativos a las características de la vía y dinámicos relativos al estado de la señalización.

Para la localización de las balizas en la vía, se realiza un estudio de la distancia a la que éstas deberán suministrar la información para:

- Provocar la detección si las condiciones de señalización son no permisivas (grupo de baliza principal)
- Enviar la información de manera adelantada para evitar una reducción innecesaria de velocidad en el caso de que el estado de la señalización cambie de no permisivo a permisivo (grupo de balizas in-fill)
- Enviar la referencia del punto geográfico en la que se encuentran para corregir errores de localización del tren.

Las balizas serán las responsables de informar al Sistema de Señalización Embarcado del estado de la señalización, enviando para ello datos tales como:

- Configuración y Tipo de Baliza
- Aspecto de la Señal o Señales por Delante
- Restricción Civil de Velocidad Máxima
- Distancia al Punto de Parada
- Gradiente Estático del Tramo
- Distancia a la Próxima Baliza

Las balizas son instaladas entre los carriles y es un elemento pasivo basado en el acoplamiento inductivo, que se activa gracias a la señal de excitación emitida por la antena del tren.

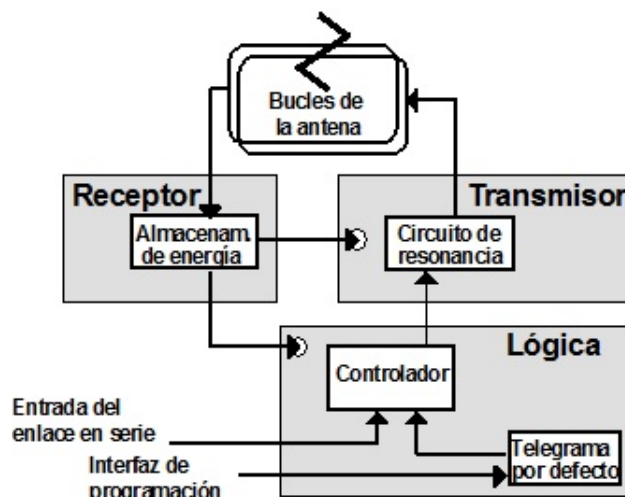


*Ilustración 29: Baliza*



Existen dos tipos de balizas:

- Balizas controladas: son aquellas que transmiten distinta información, recibida de codificadores, dependiendo del estado de la señalización para el envío de datos variables como son la velocidad, aspecto de las señales por delante, ocupaciones, etc.



*Ilustración 30: Funcionamiento Baliza Controlada*

- Balizas no controladas: son aquellas que siempre transmiten la misma información independientemente del estado de la señalización y son normalmente usadas como referentes geográficos.

#### 2.4.1.4.2 Circuitos de Vía Codificados

Los circuitos de vía codificados son los elementos del Sistema de Señalización que permiten no sólo realizar la función de detección de tren anteriormente descrita, sino que adicionalmente permiten el envío de datos estáticos relativos a las características de la vía y dinámicos relativos al estado de la señalización, de una manera análoga a las balizas.

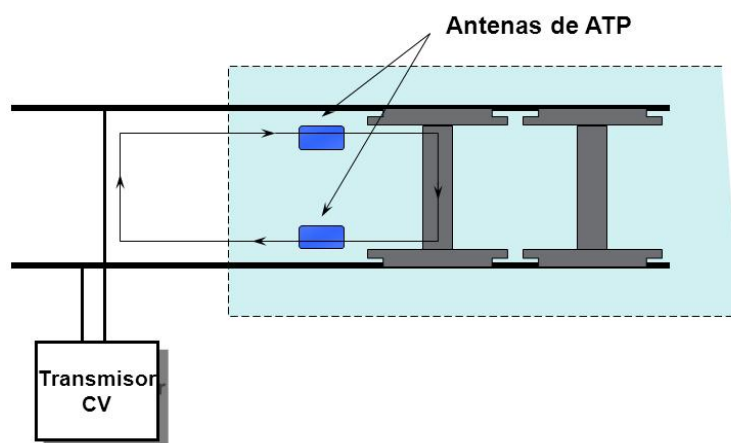
Los circuitos de vía codificados funcionan a un único valor de frecuencia en un rango comprendido entre 5 y 9 KHz, lo que permite identificar cada uno de los circuitos de manera unívoca y están compuesto por un transmisor y un receptor orientables dependiendo del sentido de circulación.



*Ilustración 31: Circuitos de Vía Codificados*



Los circuitos de vía codificados permiten el envío de la información a lo largo de toda su longitud posibilitando una emisión continua de datos. La continuidad del carril es utilizada en los circuitos de vía codificados como medio de transmisión entre el transmisor del circuito de vía y la antena del tren:



*Ilustración 32: Transmisión de datos desde el circuito de vía codificado al tren*

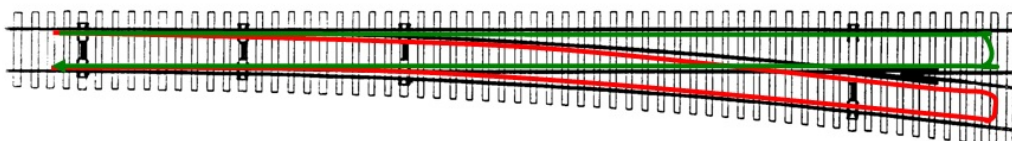
Los circuitos de vía codificados serán los responsables de informar al Sistema de Señalización Embarcado del estado de la señalización enviando para ello datos tales como:

- Identificador del Circuito
- Restricción Civil de Velocidad Máxima
- Distancia al Objetivo
- Velocidad al Objetivo
- Gradiente al Objetivo
- Restricción al Objetivo

#### 2.4.1.4.3 Lazos de Transmisión

Los lazos de transmisión son los elementos del Sistema de Señalización que permiten realizar la función de transmisión descrita en los circuitos de vía codificados en los desvíos puesto que la morfología del desvío dificulta la continuidad del carril.

Los lazos de transmisión al igual que los circuitos de vía codificados permiten el envío de la información a lo largo de toda la longitud del desvío por lo que posibilitan una emisión continua de datos.



*Ilustración 33: Configuración Lazos de Transmisión en Aguja*

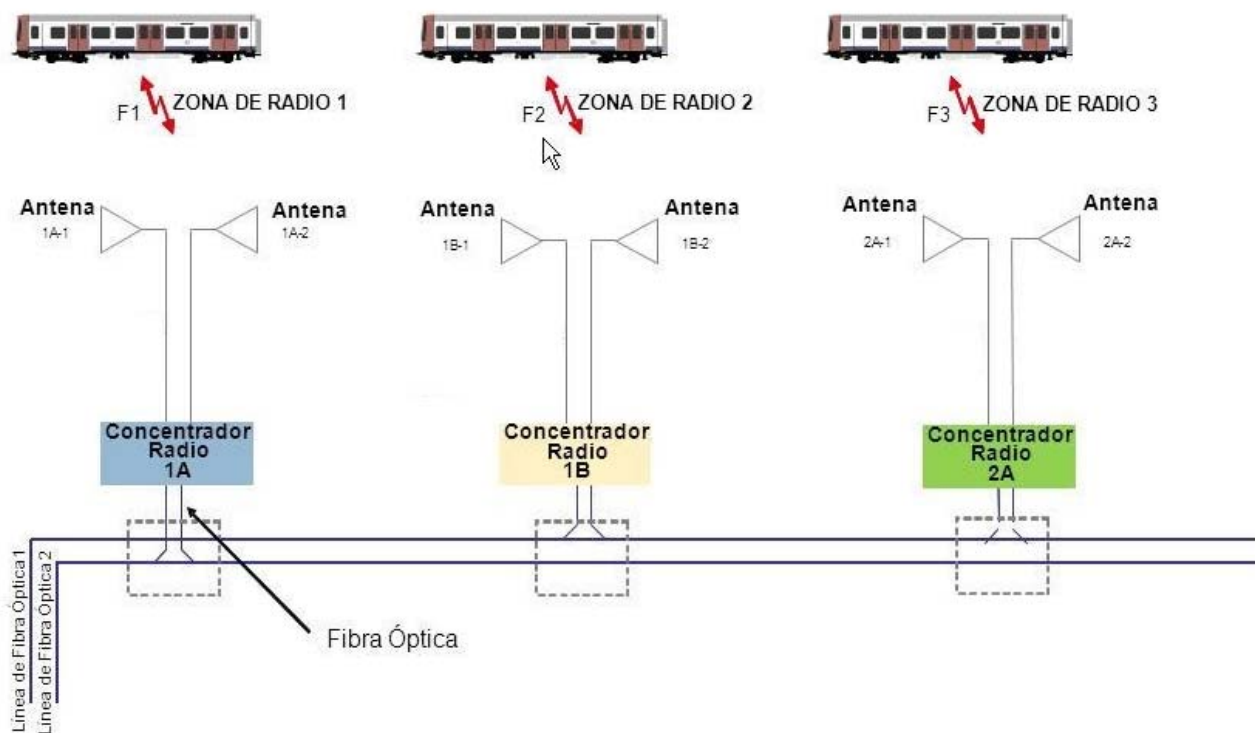


#### 2.4.1.5 Equipamiento de Vía: Sistema de Radio

El Sistema de Radio es el equipamiento de vía que permite el intercambio de información entre el Sistema de Señalización en Vía y el Sistema de Señalización Embarcado.

El equipamiento del Sistema de Radio en vía puede estar constituido por antenas discretas, normalmente instalada en el exterior o por cables radiantes, normalmente instaladas en túnel, que componen un sistema de transmisión continuo de alta disponibilidad.

A continuación, se presenta la distribución del Sistema de Radio en caso de que el sistema de transmisión entre el tren y el equipamiento de vía se produzca a través de antenas discretas a lo largo de la vía:



*Ilustración 34: Arquitectura Sistema de Radio por Antena*

A continuación, se presenta la distribución del Sistema de Radio en caso de que el sistema de transmisión entre el tren y el equipamiento de vía se produzca a través de cable radiante a lo largo de la vía:

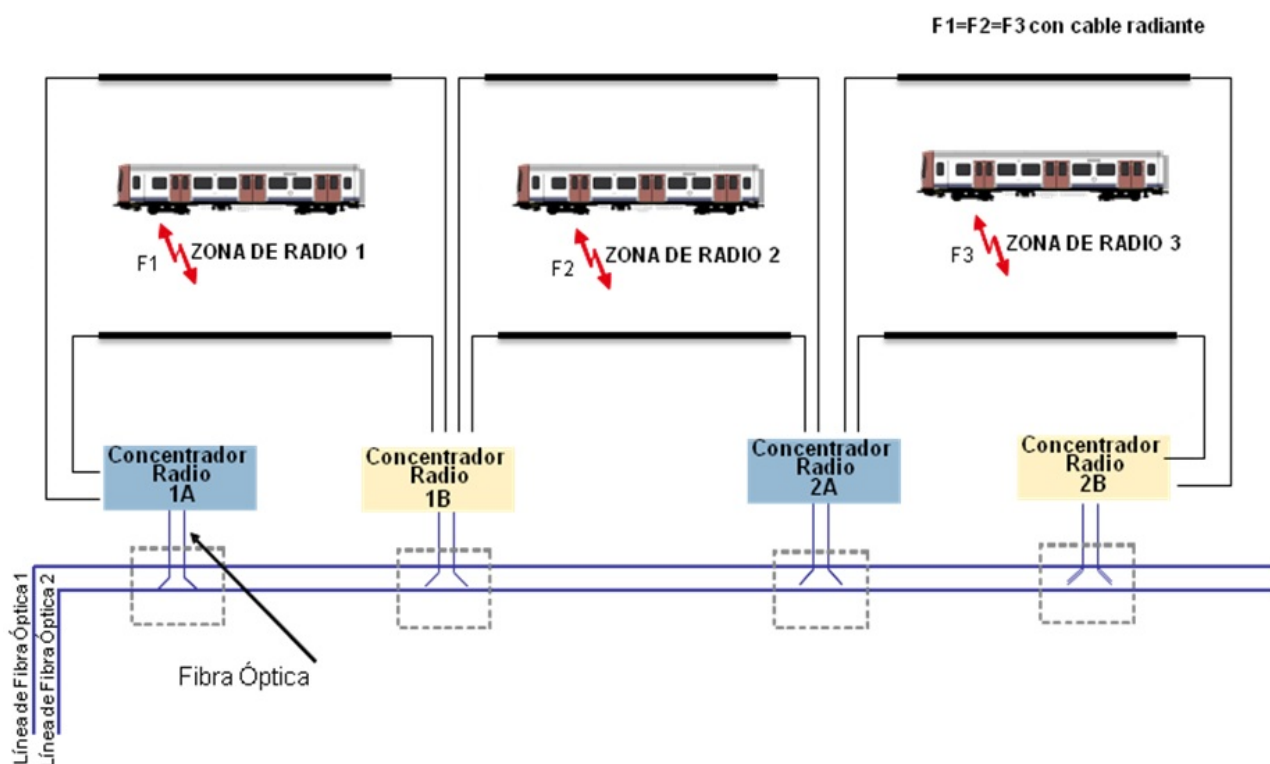


Ilustración 35: Arquitectura Sistema de Radio por cable radiante

Una vez que la información ha sido retransmitida por el equipamiento del Sistema de Radio en vía y capturada por las antenas del tren, ésta es transferida al Sistema de Radio móvil que retransmite la información al Sistema de Señalización Embarcado.

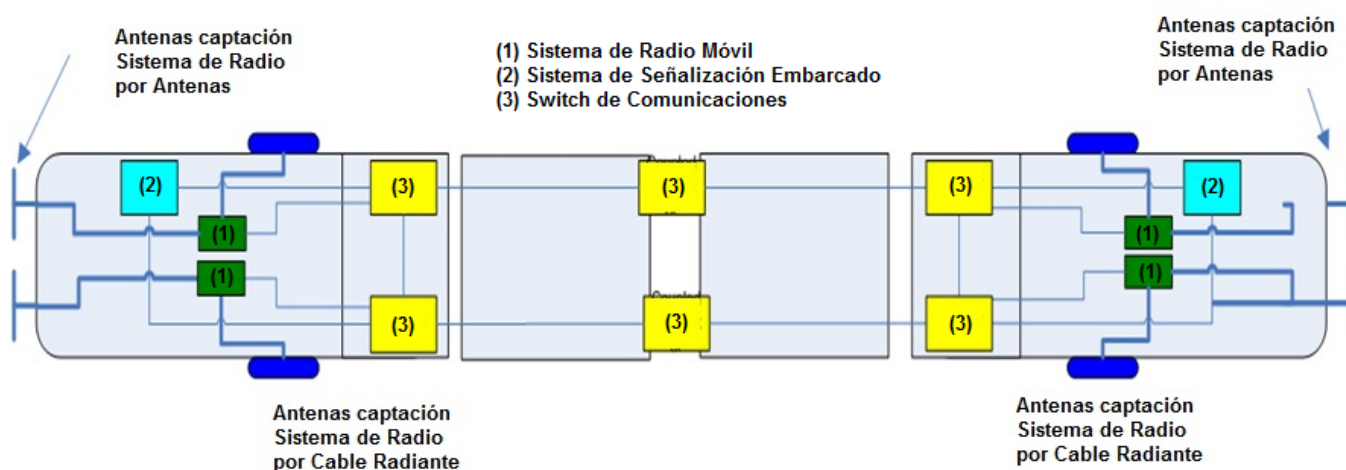
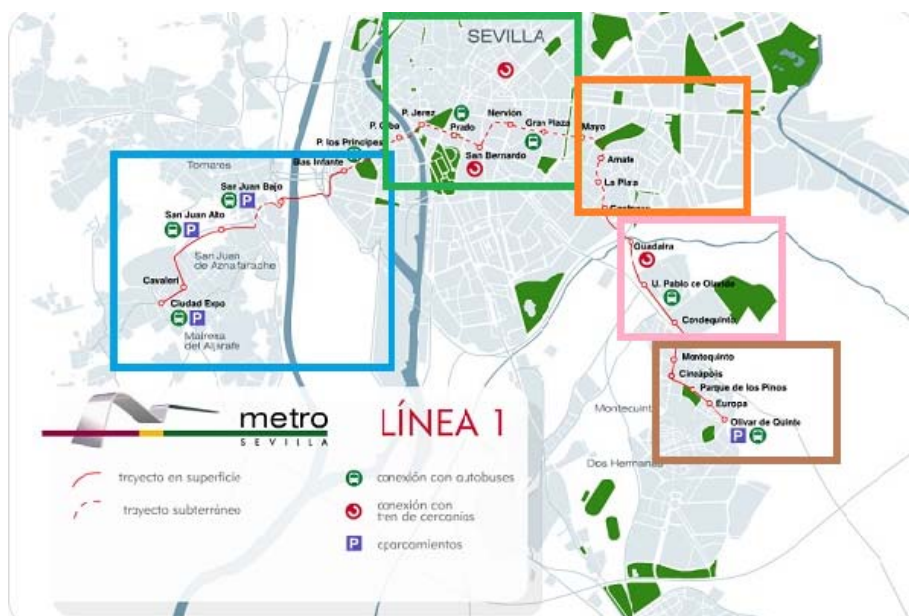


Ilustración 36: Antenas de Tren

#### 2.4.1.6 Sistema de Control y Supervisión de los Elementos de Vía - Enclavamiento

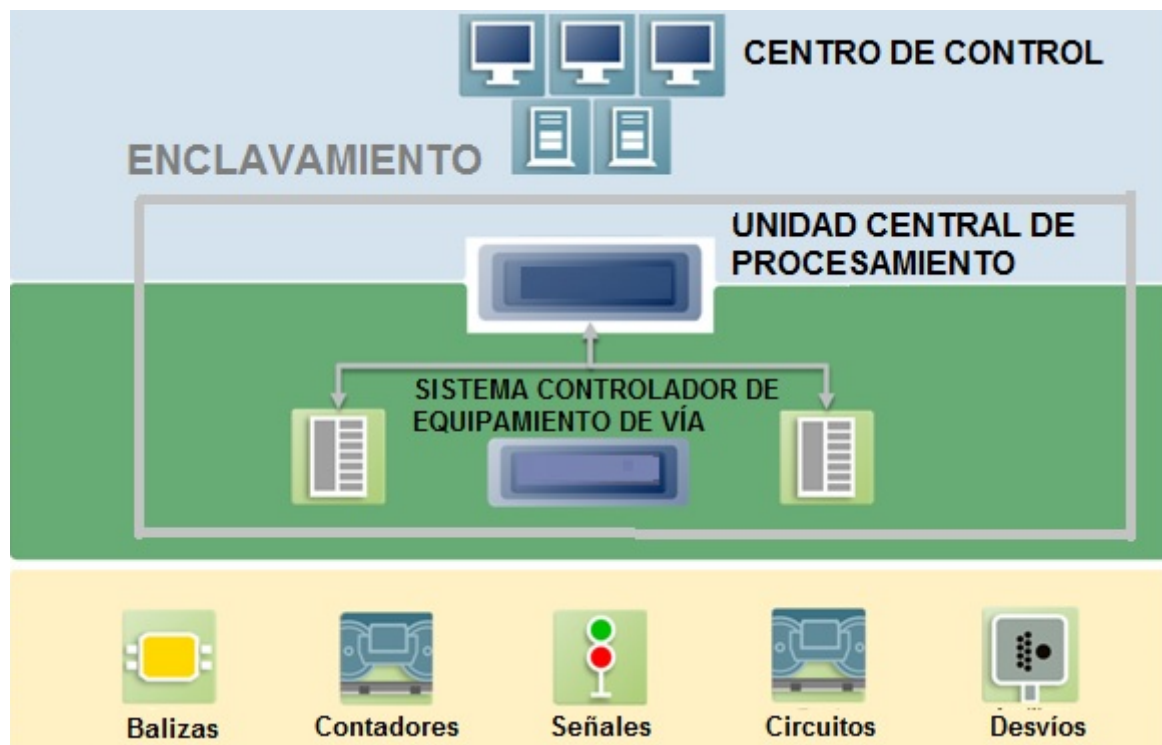
En una determinada línea, los equipamientos de vía antes descritos se dividen en distintas áreas de control que son gestionadas por el Sistema de Control y Supervisión de los Elementos de Vía, también conocido como Enclavamiento, existiendo normalmente varios enclavamientos por línea.



*Ilustración 37: Distribución de Enclavamientos en una Línea*

Cada uno de los Enclavamientos en los que se divide la línea metropolitana está compuesto por los siguientes módulos:

- Unidad Central de Procesamiento: ejecuta las reglas de señalización de una determinada Administración Ferroviaria y envía las correspondientes órdenes al Sistema Controlador de Equipamiento de Vía.
- El Sistema Controlador de Equipamiento de Vía: ejecuta las órdenes recibidas desde la Unidad Central sobre el Equipamiento de Vía e informa a la Unidad Central de Procesamiento del estado del Equipamiento de Vía.



*Ilustración 38: Arquitectura del Enclavamiento Electrónico*

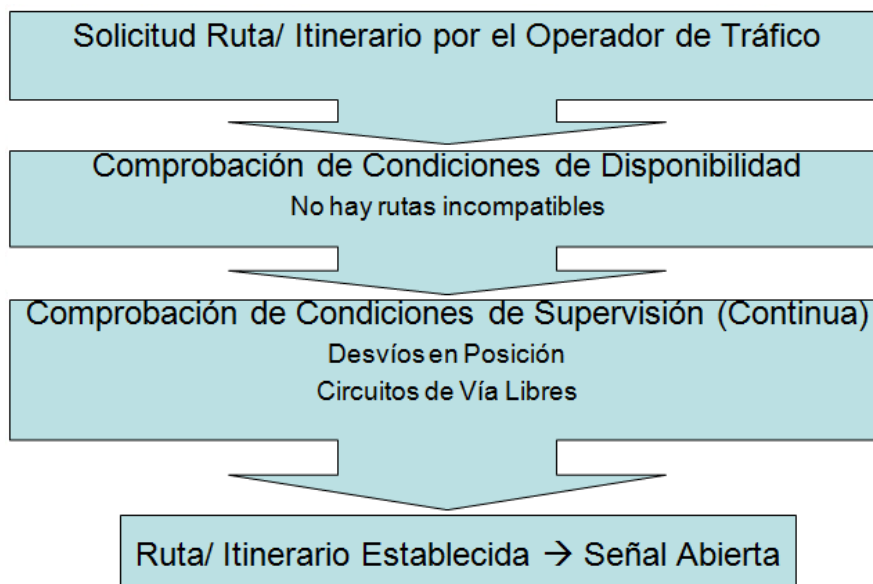
Las funciones principales de los enclavamientos son:

- Control y supervisión del equipamiento de vía correspondiente a su área de control:
  - Recepción del estado de los equipos de detección
  - Envío de órdenes de movimiento a los aparatos de vía y recepción del estado
  - Envío de órdenes de apertura y cierre de señales y recepción del estado
  - Envío de órdenes para la emisión de datos a balizas, lazos y circuitos de vía codificados.
- Procesamiento de los mandos de operador recibidos desde el Centro de Control y envío de indicaciones al Centro de Control para su representación.
- Establecimiento y disolución de rutas/itinerarios que aseguran la circulación del tren tanto internamente, dentro del área de control, como externamente, en la frontera con el área de control contigua.
- Para ello, la Unidad Central de Procesamiento procesa la solicitud de ruta enviada desde el Centro de Control y realiza la comprobación de las condiciones de establecimiento de la ruta solicitada, de acuerdo a los datos suministrados por el Sistema Controlador de Equipamiento de Vía y la presencia de otras rutas incompatibles con la ruta solicitada, previamente establecidas.





Una vez establecida la ruta, se comprueban las condiciones de apertura de señal, que permitirán al tren avanzar sobre esa señal y recorrer la ruta.



*Ilustración 39: Formación de Itinerario*

- Envío de órdenes al Sistema de Señalización Embarcado para la separación segura de trenes en función del aspecto de la señalización. Para ello, el enclavamiento envía las órdenes a los Sistemas de Transmisión en vía: circuitos, lazos y balizas, que serán transmitidos al Sistema de Señalización Embarcado.

Actualmente en las distintas líneas de ferrocarril metropolitano se encuentran enclavamientos de tipo eléctrico y electrónico, siendo esta última opción la preferente en caso de instalaciones nuevas o renovaciones tecnológicas en una línea existente:

Los enclavamientos eléctricos o de relés están basados en instalaciones realizadas por circuitos eléctricos compuestos por relés de seguridad que gestionan la lógica de la señalización, sin embargo, los enclavamientos electrónicos presentan las siguientes características:

- Sistemas de seguridad basados en arquitectura redundante tanto a nivel de procesamiento, como a nivel de comunicaciones, por lo que cualquiera de las unidades de proceso es capaz de funcionar de manera autónoma en ausencia de la otra en configuraciones .2oo3, 2 - 2oo2, etc.
- Cada una de las unidades está compuesta a su vez por procesadores redundantes que controlan en tiempo real la operación del enclavamiento y envían la información al equipamiento de vía y las órdenes enviadas desde el Puesto de Control.
- Tanto el hardware como el software de los enclavamientos, son diseñados y desarrollados en cada una de sus fases del ciclo de vida de acuerdo a la normativa CENELEC “European Committee for Electrotechnical Standardization”, de aplicación para sistemas de seguridad con nivel System Integrity Level 4, SIL4.



Entre las ventajas de la utilización del enclavamiento electrónico con respecto al enclavamiento eléctrico se encuentran:

- Menor coste de instalación
- Reducción de tamaño
- Reducción del trabajo y tiempo de instalación
- Mayores flexibilidades de mantenimiento
- Mayores facilidades, rapidez y seguridad para la realización de reformas en la instalación

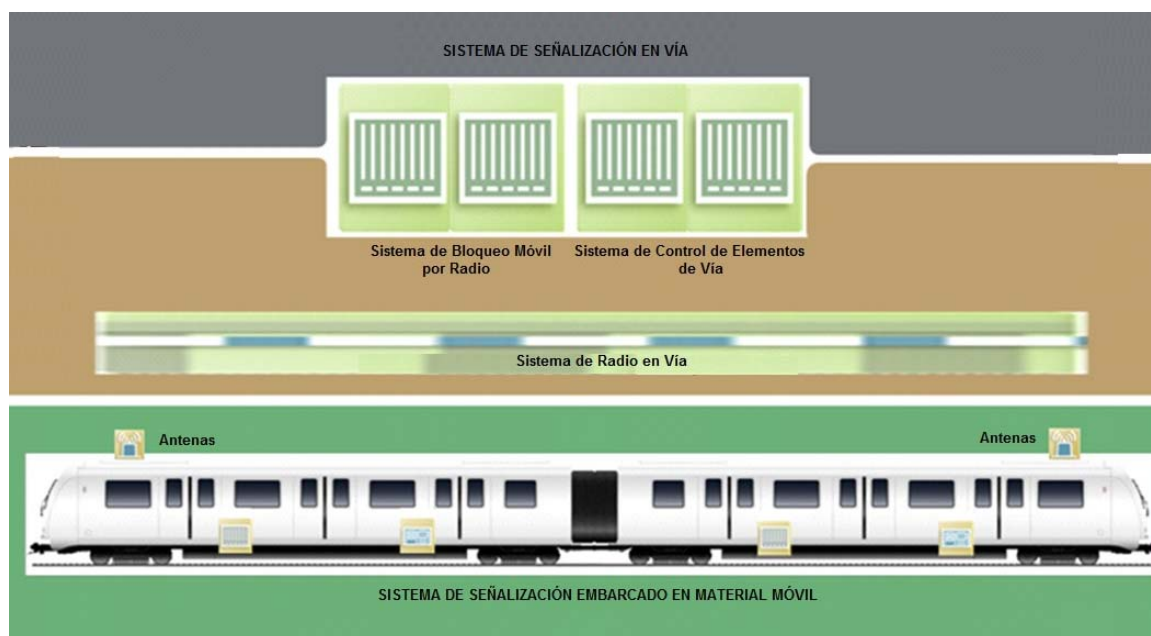
#### 2.4.1.7 Sistema de Bloqueo Móvil por Radio

En los sistemas de señalización basados en cantón móvil, se instala un equipamiento de vía adicional al Sistema de Control y Supervisión de los Elementos de Vía.

Este equipamiento de vía, denominado Sistema de Bloqueo Móvil por Radio, se comunica por una parte con el Sistema de Control y Supervisión de los Elementos de vía y por otra parte, con el Sistema de Señalización Embarcado a través del Sistema de Radio en vía.

El Sistema de Bloqueo Móvil por Radio tiene como función principal el envío al equipamiento embarcado de las autoridades de movimiento en función del aspecto de la señalización y de la posición reportada por los trenes.

El envío de estas órdenes se realiza a través del Sistema de Radio y la información es recibida en el equipamiento embarcado a través de las antenas del tren.



*Ilustración 40: Sistema de Bloqueo Móvil por Radio*

El Sistema de Bloqueo Móvil por Radio es un sistema de seguridad de nivel SIL4 basado en arquitectura redundante y en los que tanto el hardware como el software son desarrollados de acuerdo a la normativa CENELEC.



## 2.4.2 Sistemas de Señalización Embarcado en Material Móvil

Los Sistemas de Señalización Embarcado en Material Móvil se clasifican en los siguientes grupos:

- Sistema de Protección Automático de Trenes (ATP)
- Sistema de Conducción Automático de Trenes (ATO)

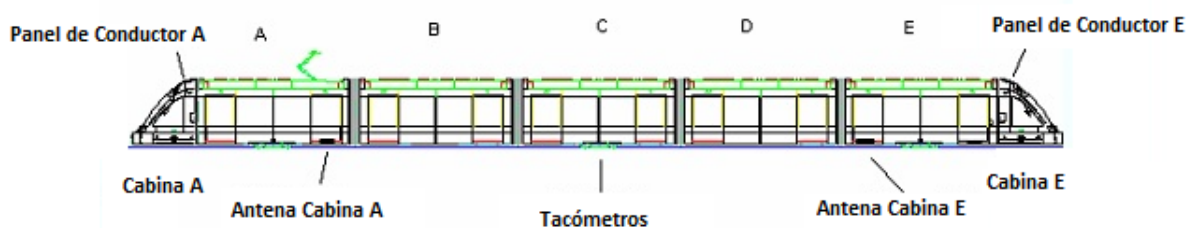
### 2.4.2.1 Sistema de Protección Automático de Tren

La principal tarea del Sistema de Protección Automático de Tren es supervisar la velocidad en cada momento y suministrar al conductor, a través del panel de conducción, la información relativa a la velocidad máxima permitida y la distancia a la que se encuentran los objetivos de velocidad, basado en las condiciones de la vía y los datos recibidos del tren.

El Sistema de Protección Automático de Tren complementa al sistema de señalización en vía. El maquinista deberá seguir las indicaciones recibidas en el panel de conducción, en caso contrario, el Sistema de Protección Automático actúa sobre el sistema de tracción y frenos.

En cada tren, se instala una cabina de conducción por sentido de movimiento con su correspondiente panel de conducción. Cada cabina de conducción se encuentra en comunicación con el Sistema de Protección Automático de Tren, que entrará en funcionamiento en uno u sentido en función de la cabina activada.

Para el cálculo de la velocidad máxima permitida y la distancia a la que se encuentran los objetivos de velocidad, el Sistema de Protección Automático utiliza la información recibida desde el Sistema de Señalización en vía.



*Ilustración 41: Situación Del Equipamiento de Protección en el Tren*

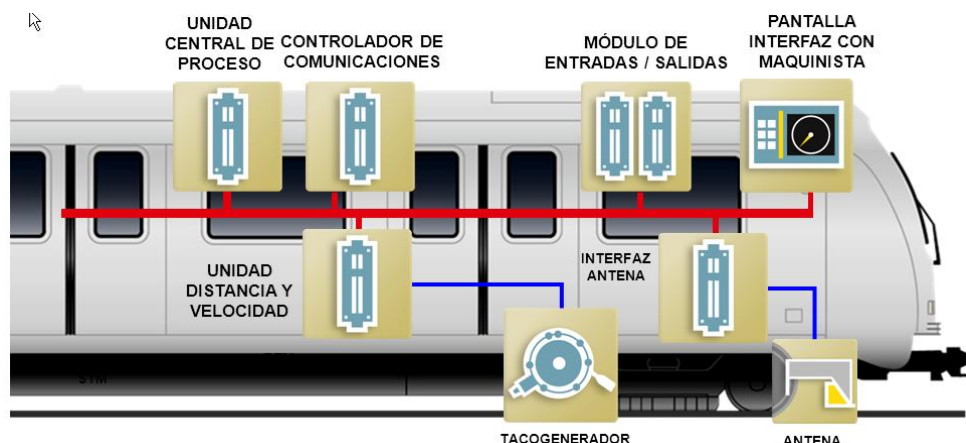
Para la supervisión de la velocidad en cada momento se consideran los siguientes parámetros:

- El estado de activación de cada cabina y la dirección de control que se encuentra activa.
- Deceleración durante el freno de servicio o de emergencia, los diferentes gradientes en la línea y el periodo de tiempo existente desde que se aplica el freno hasta que éste entra realmente en funcionamiento, información recibida desde los tacómetros y la antena.
- Cada tren, a la misma velocidad, tendrá distintos parámetros de eficiencia en freno, por lo que podrá comenzar a frenar más tarde, lo que supondrá una variable adicional a sumar en los cálculos y que será enviada desde el sistema de frenos.

Para ello, el Sistema de Protección Automático de Tren consta de los siguientes equipamientos:



- Unidad Central de Proceso. cuya función principal es la de supervisar la velocidad en cada momento y la velocidad objetivo, y si es necesario, ordenar freno.
- Unidad de Distancia y Velocidad cuya función principal es calcular la posición y la velocidad a partir de las señales recibidas del tacogenerador.
- Módulo de entradas y salidas vitales/no vitales para la recepción / envío de la información entre los diferentes equipamientos: apertura y cierre de puertas y actuación sobre el sistema de freno.
- Controlador de comunicaciones. cuya función principal es supervisar la comunicación interna entre las unidades.
- Módulo interfaz con antena: cuya función principal es comunicar la antena del tren con el resto de equipamiento.
- Tacogenerador: montado en el eje del tren, cuya principal función es la generación de pulsos que permiten calcular la velocidad y la distancia recorrida.



*Ilustración 42: Arquitectura del Sistema de Protección Automático de Tren*

Una vez recibida la información de los diferentes equipos, el Sistema de Protección Automático indicará al conductor la velocidad máxima permitida en el panel de conducción permitiendo un pequeño margen antes de emitir un aviso sonoro de alarma. Si pese a ello, el conductor no se adecuara a la velocidad permitida, el Sistema de Protección Automático solicitaría el freno de servicio y la desconexión de la tracción del vehículo. Normalmente, eso es suficiente para disminuir la velocidad hasta la el valor permitido. En el caso de que el freno de servicio no resultara suficiente, el Sistema de Protección Automático solicitaría la inmediata parada del tren aplicando el freno de emergencia.

El Sistema de Protección Automático permite diferentes modos de conducción para gestionar las distintas situaciones operaciones entre las que se encuentran:

- Modo de Supervisión Completa (Full Supervision): protección completa usada normalmente durante la operación comercial del sistema.



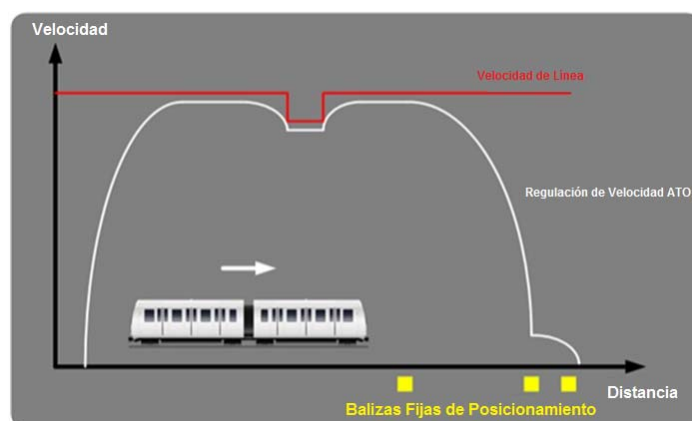
- Modo de Supervisión Parcial (Shunting, Pass Stop, On-Sight, etc.): protección parcial en modo de maniobras, rebase de señal en rojo, marcha a la vista, etc. en los que el sistema cede parte de la responsabilidad del movimiento seguro del tren al conductor a fin de aumentar la operatividad en escenarios degradados.
- Modo de Supervisión en Espera (Standstill): sin protección mientras el sistema realiza las pruebas antes de arrancar o tras un fallo o reinicio.
- Modo Sin Supervisión (Slave): por desconexión del sistema en una de las dos cabinas o por desconexión total del sistema.

#### 2.4.2.2 Sistema de Operación Automático de Tren

El sistema de Operación Automático es un sistema de control para la automatización de la conducción del tren cuyas principales funciones son:

- Mejorar la explotación de la línea metropolitana reduciendo el intervalo de viaje mediante la optimización de las curvas de velocidad calculadas por el Sistema de Protección Automático
- Realiza la conducción automática del tren entre estaciones, tras la orden de arranque dada por el conductor
- Flexibilizar las operaciones con la regulación de parámetros como los intervalos de salidas según la banda horaria recibidas desde el Centro de Control.
- Ajustar el punto de parada para trenes de diferentes longitudes en las estaciones mediante el suministro de datos enviados por las balizas de posicionamiento situadas en las estaciones.
- Disminuir de la energía consumida mediante la optimización del uso del sistema de tracción del tren.

El Sistema de Operación Automático de Tren mejora la explotación de la línea metropolitana mediante la interacción con el sistema de Sistema de Protección Automático de Tren del cual obtiene los datos de velocidad máxima permitida y la distancia a la que se encuentran los objetivos de velocidad. Una vez obtenidos los datos, el sistema calcula la curva de velocidad más óptima a la que automáticamente circulará el tren.



*Ilustración 43: Regulación de Velocidad ATO*



En caso de que el Sistema de Protección Automático detecte un rebase de velocidad máxima, éste conserva la libertad de anular el efecto del Sistema de Operación Automático y aplicar los frenos de emergencia.

De esta manera, y en caso de que no se detecte ninguna situación de emergencia, el sistema de señalización no requiere de un conductor para acelerar o frenar el tren, y tampoco para la detención del tren en los puntos de parada. La única tarea responsabilidad del conductor es iniciar la marcha mediante las correspondientes órdenes de salida de estación y la correspondiente apertura y cierre de las puertas del tren para la entrada y salida de pasajeros en las mismas.

Para la localización correcta de los trenes en las estaciones, el Sistema de Operación Automático de Tren recibe mensajes del equipamiento de vía a través de balizas fijas de posicionamiento que permiten la detección exacta de tren en el andén, situando el tren en función de su longitud, en el punto exacto en que ningún vagón pueda quedar dentro del túnel lo que impediría la entrada y salida de viajeros.





## 2.5 Clasificación de los tipos de sistemas de señalización

Los sistemas de señalización pueden clasificarse atendiendo a los siguientes criterios:

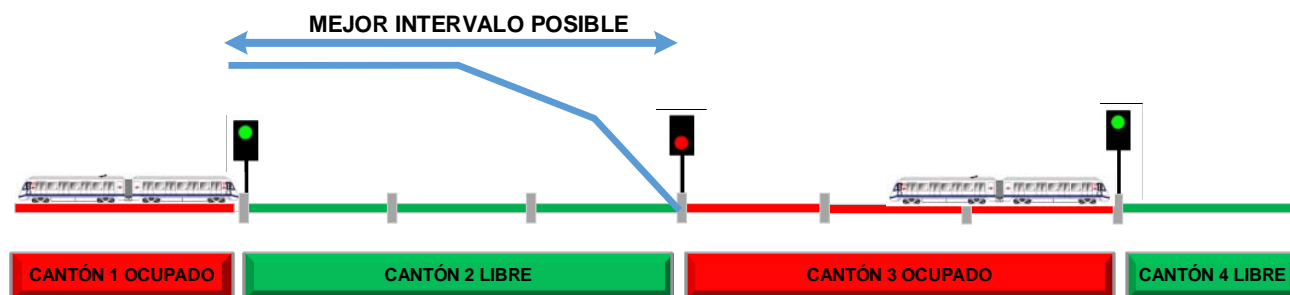
- El tipo de cantonamiento
- El nivel de protección ATP
- El nivel de automatización

### 2.5.1 Tipo de Cantonamiento – Cantón Fijo / Móvil

Se define **cantón** como la de distancia fija entre dos puntos en la que sólo se permite la circulación de un tren.

En base a esta definición, se pueden diferenciar dos tipos de cantonamiento, que resultan de la localización de esos dos puntos y que podrán ser fijos o móviles dependiendo de la solución de señalización:

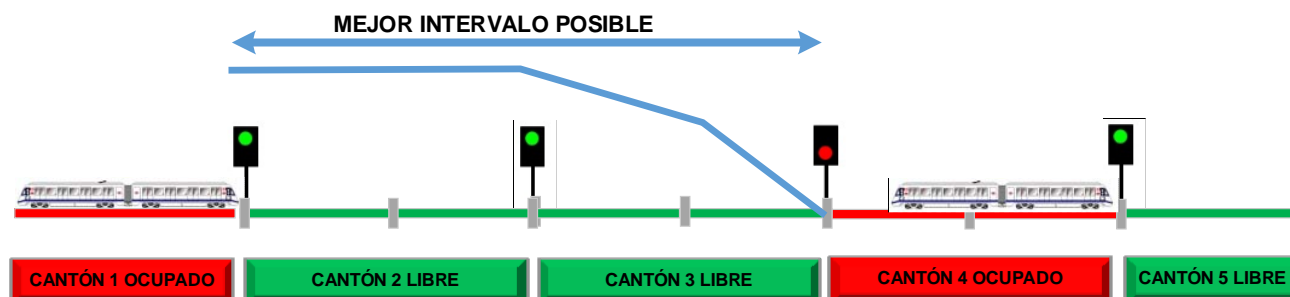
- **Cantón Fijo:** la línea se divide en secciones o cantones fijos, protegidos por señales. Cada sección o cantón tendrá asociado una señal, que autoriza la entrada de un tren en el cantón si éste está libre e impide la entrada de un segundo tren si éste está ocupado.



*Ilustración 44: Sistema de Cantón Fijo*

La longitud de cada cantón viene determinada por las necesidades de explotación de la línea, siendo longitudes pequeñas en el caso de soluciones metropolitanas, con objeto de permitir el paso de un segundo tren sobre el cantón lo más rápido posible.

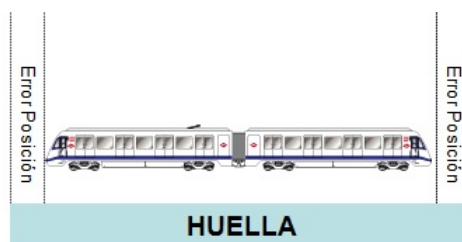
Mediante la distribución de los cantones a lo largo de la línea metropolitana, el sistema puede ser optimizado, obteniendo una mejor frecuencia de trenes:



*Ilustración 45: Sistema de Cantón Fijo Optimizado*

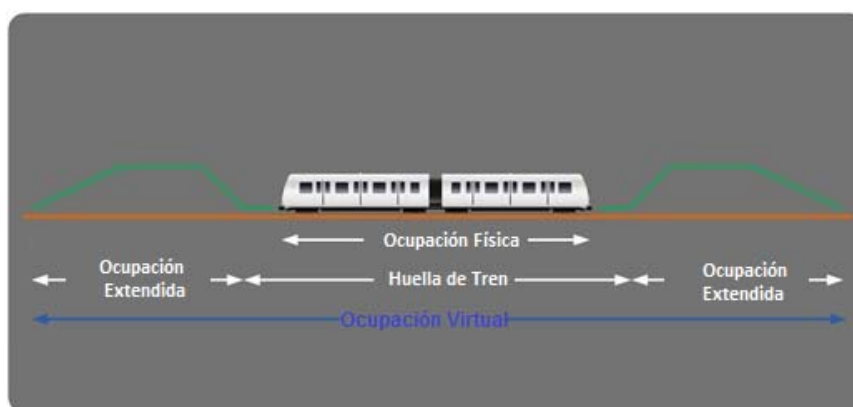
- **Cantón Móvil:** la línea se divide en secciones o cantones determinados de forma dinámica por las ocupaciones de los trenes, de tal manera que un tren puede avanzar hasta la ocupación del tren que lo precede, que se desplaza junto con el propio tren.

La longitud de la ocupación física del tren es calculada como la suma de la propia longitud del tren más el correspondiente error de posición, que determina la “huella” del tren.



*Ilustración 46: Ocupación del Tren*

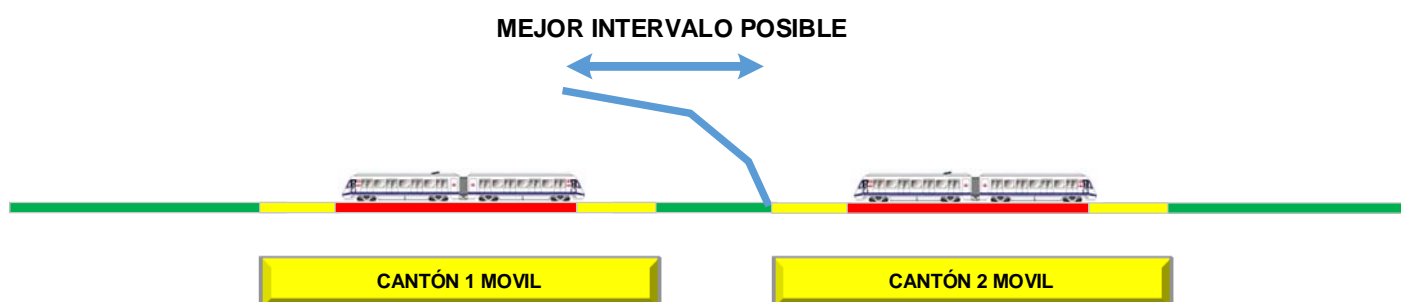
Para la determinación de la ocupación total se añaden los parámetros dinámicos relativos a la velocidad que junto con la huella del tren, generan la denominada ocupación virtual, que no tendrá un valor fijo, sino que será variable en función de la velocidad del tren.



*Ilustración 47: Ocupación Virtual*



Una vez determinada la ocupación del tren precedente, y la ocupación del tren anterior, se establecerán al igual que en el cantón fijo, los dos puntos en los que sólo estará permitida la circulación de un tren, pero a diferencia del cantón fijo, en el que estos dos puntos eran representados por señales fijas, en el cantón móvil los dos puntos tienen movimiento, con lo cual, el cantón resultante es denominado cantón móvil.



*Ilustración 48: Sistema de Cantón Móvil*

#### 2.5.2 Nivel de Protección: Sistema de Protección Automático: Puntual - Continuo

Los sistemas de señalización de los ferrocarriles metropolitanos pueden ser clasificados en cuanto al tipo de protección automático de tren siendo éste puntual o continuo.

- **Puntual:** la solución de señalización está basada en la protección automática de los trenes mediante el suministro de información de manera puntual en determinados puntos de la línea metropolitana.

La información es suministrada a través de balizas situadas a pie de señal que informan de la distancia hasta la siguiente señal en rojo y de las restricciones de velocidad existentes hasta ese punto, por lo que el sistema es capaz de calcular una curva teórica de velocidad a la que el tren debe circular. Una vez que la curva es calculada, el sistema de protección supervisa continuamente la velocidad a la que circula el tren y no actualiza la curva hasta no recibir nuevos datos en la baliza siguiente.

Con objeto de aprovechar un cambio de aspecto de señal a un nuevo aspecto menos restrictivo (paso de rojo a verde) una vez que el tren ha sobrepasado la baliza a pie de señal, se sitúan balizas “in-fill” de avance de la información, de tal manera que el tren obtiene una información adelantada que le permite adecuar su velocidad a las condiciones de señalización de la línea y ganar tiempo.

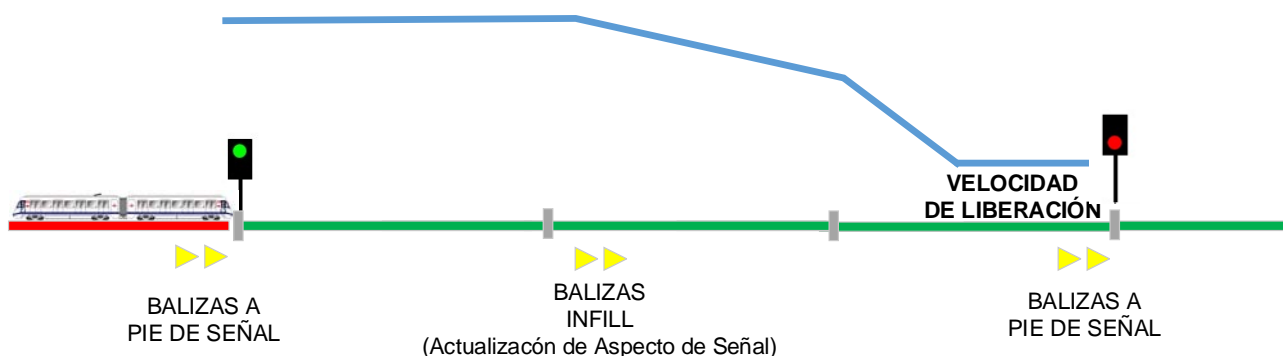
En caso de que el aspecto de señal cambie a un aspecto más restrictivo y la baliza “in-fill” se encuentre a la suficiente distancia de frenado, ésta también actuará como avance de información lo que evitará que el tren sobrepase la señal en rojo.

Debido a la existencia de errores acumulados por la odometría del tren, los cálculos hechos por el sistema sobre la distancia al punto de parada serán siempre calculados aplicando un margen de error por lo que provocan la parada del tren antes del punto de parada real. Esto es resuelto en los sistemas de protección puntual con la existencia de la velocidad de liberación, que fija un valor de velocidad bajo para la aproximación del tren al punto de parada (típicamente entre 15 y 30 Km/h).



En el punto de parada, el sistema de protección automático supervisará que la velocidad se reduce hasta la velocidad de liberación, y el conductor será responsable de no sobrepasar ese punto. El tren estará autorizado a pasar una vez que la señal se encuentre en verde.

En caso de que existiera un error por parte del conductor, y éste tratara de rebasar una señal en rojo, el sistema de protección actuaría sobre los frenos del tren y aplicaría el freno de emergencia provocando la parada inmediata del tren.



*Ilustración 49: Sistema de Protección Automático Puntual*

- **Continuo:** la solución de señalización está basada en la protección automática de los trenes mediante el suministro de información de manera continua a lo largo de la línea metropolitana.

La información es suministrada a través de circuitos de vía codificados, lazos o radio situados a lo largo de toda la línea por lo que el sistema es capaz de calcular una curva teórica de velocidad a la que el tren debe circular. Una vez que la curva es calculada, el sistema de protección supervisa continuamente la velocidad a la que circula el tren y actualiza la curva de manera continua.

Dependiendo de la solución implementada, los datos suministrados son diferentes, distinguiéndose las siguientes soluciones:

Sistemas de Velocidad Máxima/Velocidad Objetivo: los datos transmitidos al tren son la velocidad máxima, derivada de la restricción civil en ese circuito, y la velocidad objetivo, a la que deberá ajustarse a lo largo de la longitud del circuito de vía.

La velocidad objetivo será calculada, en función de la ocupación del tren precedente, asumiendo que la ocupación de cualquier punto del circuito de vía implica la ocupación total del mismo, no siendo posible una granularidad mayor. Una vez calculada, la velocidad objetivo, será corregida de acuerdo a parámetros tales como tiempos de actuación, deslizamientos en condiciones de adherencia desfavorables, etc.

Una vez calculados, los parámetros de velocidad máxima y velocidad objetivo son transmitidos al tren durante todo el circuito de vía, no siendo actualizada esta información hasta el circuito de vía siguiente, incluso si las condiciones han cambiado.

Debido a que la información no puede ser corregida a lo largo de un circuito de vía, este sistema reservará siempre un circuito de separación entre trenes precedentes.

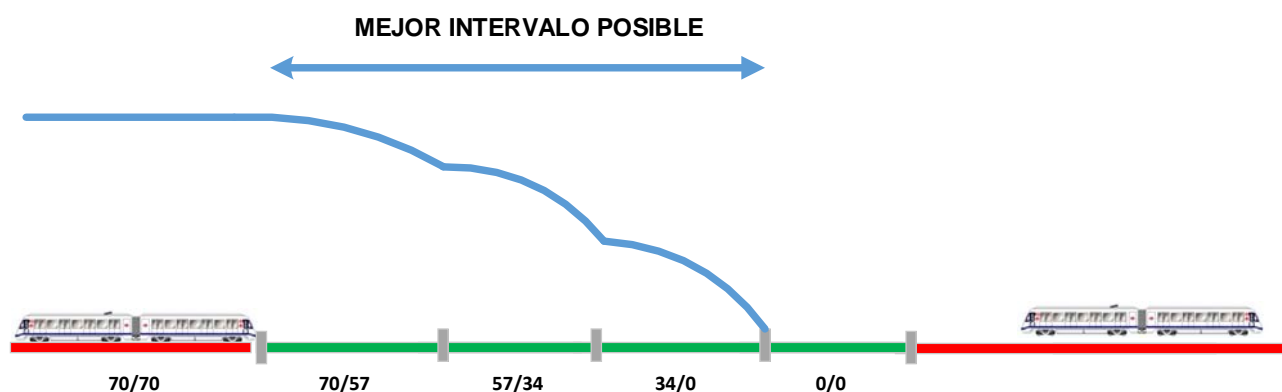


Ilustración 50: Sistema de Velocidad Máxima/Velocidad Objetivo

Sistemas de Distancia Objetivo: los datos transmitidos al tren son la velocidad máxima, derivada de la restricción civil en ese circuito, la velocidad objetivo y la distancia a la que se encuentra ese objetivo.

Al igual que en la solución anterior, la velocidad objetivo será calculada, en función de la ocupación del tren precedente, asumiendo que la ocupación de cualquier punto del circuito de vía implica la ocupación total del mismo, no siendo posible una granularidad mayor. Una vez calculada, la velocidad objetivo, será corregida de acuerdo a parámetros tales como tiempos de actuación, deslizamientos en condiciones de adherencia desfavorables, etc.

Una vez calculados los parámetros de velocidad máxima, velocidad objetivo y distancia al objetivo, éstos son transmitidos al tren durante todo el circuito de vía, siendo actualizada esta información en el caso de que las condiciones sean modificadas.

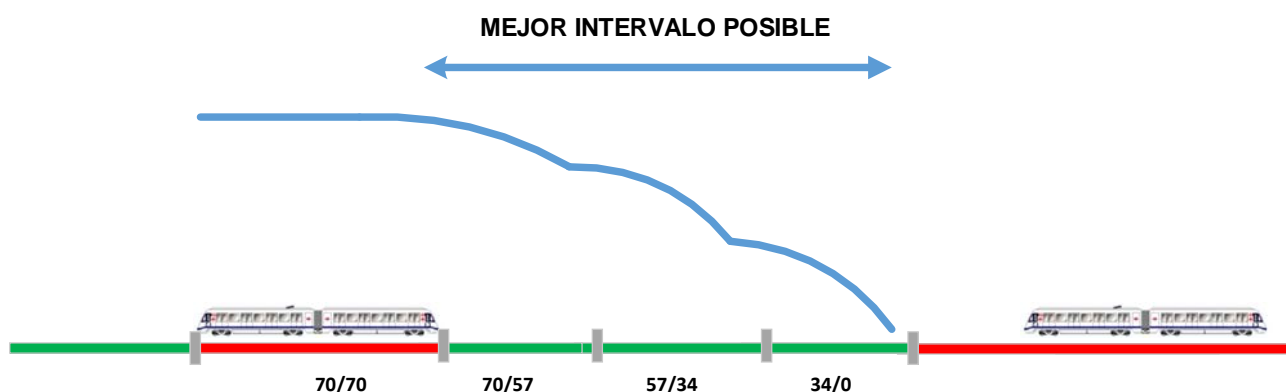


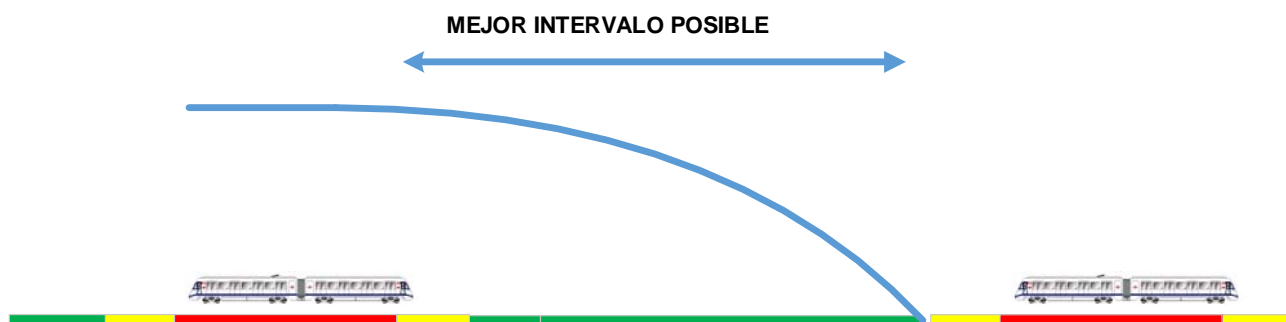
Ilustración 51: Sistema de Distancia Objetivo

Sistemas de Cantón Móvil: los datos transmitidos al tren son la velocidad máxima, derivada de la restricción civil en ese circuito, la velocidad objetivo y la distancia a la que se encuentra ese objetivo.

A diferencia de las soluciones anteriores, la velocidad objetivo será calculada en función de la **ocupación virtual** del tren precedente, siendo posible una granularidad mayor al no considerar la ocupación fija que proporcionan los circuitos de vía.



Una vez calculados los parámetros de velocidad máxima, velocidad objetivo y distancia al objetivo éstos son transmitidos al tren, siendo actualizada esta información en el caso de que las condiciones sean modificadas.

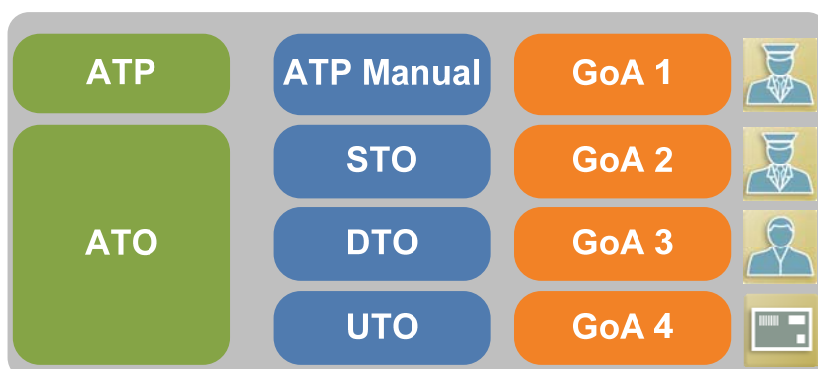


*Ilustración 52: Sistema de cantón Móvil*

### 2.5.3 Nivel de Automatización: ATO-UTO

Los sistemas de señalización de los ferrocarriles metropolitanos pueden ser clasificados en cuanto al nivel de automatización de conducción, existiendo los siguientes niveles de automatización, denominados GoA (Grades of Automation):

- GoA 0 – Conducción Manual
- GoA 1 – ATP - Automatic Train Operation
- GoA 2 – ATP + ATO – Semi-automated Train Operation
- GoA 3 – DTO - Driverless Train Operation
- GoA 4 – UTO - Unattended Train Operation



*Ilustración 53: Grados de Automatización (GoA)*

A continuación se describen las características de estos grados de automatización, así como las principales ventajas.





### 2.5.3.1 GoA 0 – Conducción Manual

En este grado de automatización, no existe ningún Sistema de Señalización Embarcado por lo que ninguna función automática está disponible, esto implica que el tren es conducido bajo la responsabilidad del maquinista y de acuerdo a la señalización lateral en la vía.

### 2.5.3.2 GoA 1 – ATP - Automatic Train Operation

En este primer grado de automatización, existe un Sistema de Señalización Embarcado en el tren compuesto por el Sistema de Protección Automático de Tren (ATP). El Sistema de Protección Automático de Tren supervisa la velocidad del tren e indica al conductor la velocidad máxima permitida en el panel de conducción, actuando sobre el freno en caso de que la velocidad no sea respetada.

En este nivel de automatización, la conducción continua siendo manual, aunque se realice bajo la supervisión del Sistema de Protección Automática; el maquinista es por tanto, responsable de la conducción y de la apertura y cierre de las puertas para la descarga de pasajeros

### 2.5.3.3 GoA 2 – ATP + ATO Semi-automated Train Operation

En este segundo grado de automatización, el Sistema de Señalización Embarcado en el tren está compuesto por el Sistema de Protección Automático de Tren y por el Sistema de Operación Automático. El Sistema de Operación Automático permite la conducción automática del tren, bajo la protección del Sistema de Protección Automático y bajo la supervisión del maquinista.

En este grado de automatización, la conducción ya no es manual, siendo ésta automática y es el Sistema de Operación Automático el responsable de la conducción. El maquinista permanece en la cabina del tren siendo su responsabilidad la apertura y cierre de las puertas para la descarga de pasajeros y por tanto, dar orden de salida del tren de la estación en el momento preciso.

En este grado de automatización ya pueden obtenerse ventajas tales como:

- Tiempo de recorrido entre estaciones predecible puesto que se eliminan las variaciones inherentes a la conducción manual.
- Mayor calidad en la conducción puesto que no se depende del estilo de conducción del maquinista.
- Reducción de picos de demanda en los sistemas de propulsión y freno del tren.
- Optimización de la energía mediante la sincronización de la curva de aceleración de un tren con la curva de freno de otro tren en la línea.



#### 2.5.3.4 GoA 3 – DTO - Driverless Train Operation

En este tercer grado de automatización, el Sistema de Señalización Embarcado está compuesto como en el grado anterior, del Sistema de Protección Automática y del Sistema de Operación Automático, pero en este nivel, el maquinista no tiene por qué permanecer en la cabina del tren, pudiéndose mover libremente a lo largo de todo el vehículo, siendo su responsabilidad la atención al viajero y la conducción del tren en caso de fallo del Sistema de Operación Automático.

En este grado de automatización, la apertura y cierre de puertas para la descarga de pasajeros y la orden de salida del tren de la estación, pueden ser dadas manual o automáticamente y desde la cabina del propio tren o desde cualquier otra localización.

En este grado de automatización no sólo se obtienen las ventajas descritas en el grado anterior, sino que adicionalmente, el tiempo al final de vuelta en la línea es optimizado, puesto que no es necesario que el maquinista realice el cambio de cabina, siendo éste realizado de manera automática.

#### 2.5.3.5 GoA 4 – UTO - Unattended Train Operation

En este cuarto y último grado de automatización, el Sistema de Señalización Embarcado está compuesto como en el grado anterior, del Sistema de Protección Automático y del Sistema de Operación Automático, pero en este nivel, no es necesario ningún maquinista para la conducción automática del tren.

En este nivel de automatización, la apertura y cierre de puertas para la descarga de pasajeros y la orden de salida del tren de la estación, son absolutamente automáticas por lo que se hace necesario contar con sistemas más avanzados anti-intrusión que eviten el atrapamiento de personas y mayor personal de control en las estaciones pues no se cuenta con personal abordo.

En este grado de automatización, además de las ventajas obtenidas en los grados inferiores, se obtienen las siguientes ventajas adicionales:

- Tiempos de recorrido fijos a lo largo de toda la línea, puesto que no se tiene dependencia ni del cambio de cabina en los finales de línea, ni del tiempo de descarga de pasajeros.
- Potencial reducción de coste de personal, puesto que no es necesaria la contratación de maquinistas, aunque este coste podría verse compensando con el coste extra de personal de seguridad necesario.
- Respuesta ágil a sobrecargas de pasajeros en la línea, simplemente añadiendo nuevos vehículos, sin requerir nuevos maquinistas adicionales.

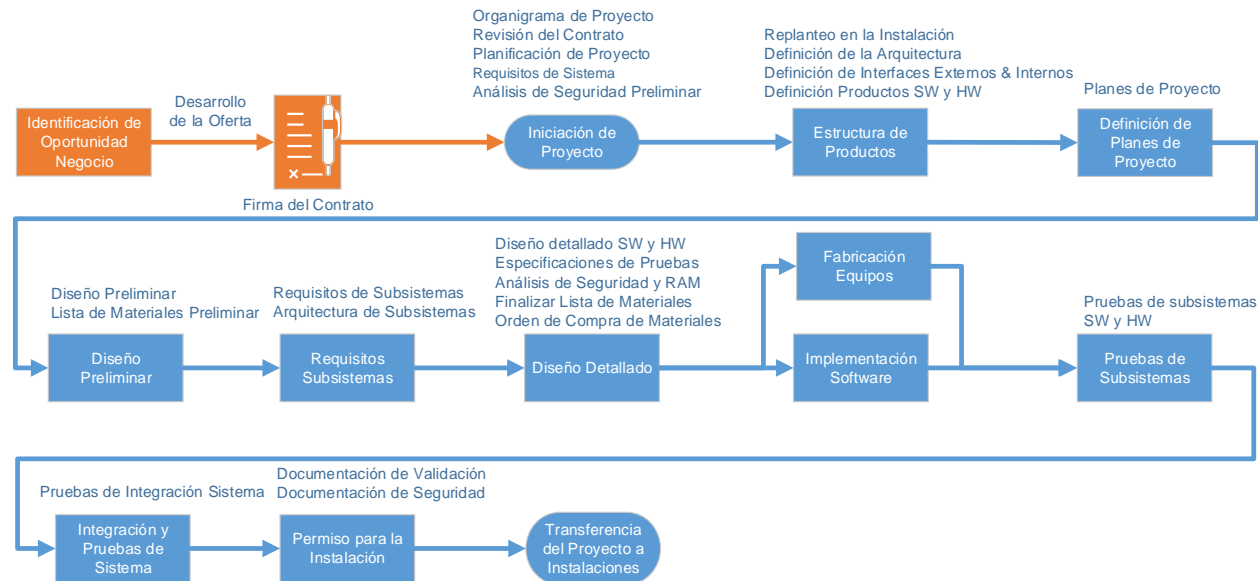


## 3 CAPÍTULO 3: EJECUCIÓN Y SELECCIÓN DEL SISTEMA DE SEÑALIZACIÓN

### 3.1 Etapas en el Desarrollo de un Sistema de Señalización

El desarrollo de un sistema de señalización sólo puede ser iniciado si se ha producido la identificación de una oportunidad de negocio y posteriormente el desarrollo de una oferta que culmine con la firma de un contrato.

En este punto, se inicia el Proyecto de Desarrollo de un Sistema de Señalización que consta de las fases descritas en el esquema adjunto:



*Ilustración 54: Etapas en el Desarrollo de un Sistema de Señalización*



### 3.1.1 Iniciación de Proyecto

La etapa de Iniciación del Proyecto establece las bases para el desarrollo de las siguientes etapas del proyecto. Las principales actividades de esta etapa son las siguientes:

- Definición del Organigrama de proyecto, que identifica los principales recursos que serán asignados al proyecto y que desarrollarán el resto de etapas.
- Revisión del Contrato de Proyecto por parte del equipo que ejecutará el proyecto a fin de establecer las bases contractuales que definirán los márgenes en los que se ejecutará el desarrollo. Tras la revisión del contrato, se realiza el correspondiente Plan de Aceptación del Sistema de Señalización, en el que se enumeran los criterios por el que el sistema será aceptado por parte del cliente: requisitos identificados y aprobados, especificaciones de pruebas, pruebas de aceptación del cliente en la instalación, etc.
- Desarrollo de la Planificación de Proyecto en base a los hitos establecidos en el contrato. Se desarrollará una planificación detallada de actividades y sus correspondientes interrelaciones, a las que se les asignarán los correspondientes recursos, responsables de su ejecución. Esto permitirá estimar el número de recursos necesarios y depurar el Organigrama de Proyecto previamente definido. La Planificación del Proyecto será actualizada a lo largo de la vida del proyecto y permitirá el control del cumplimiento de los hitos fijados.
- Definición de los Requisitos de Sistema en función del contrato acordado que permitirá la definición del Sistema de Señalización a instalar. Cada uno de los Requisitos de Sistema será derivado a uno a o varios subsistemas.
- Análisis de Seguridad Preliminar: en base a los Requisitos de Sistema, se desarrollará un Análisis Preliminar de Seguridad que tendrá como objetivo la identificación de las amenazas de seguridad existentes en el Sistema de Señalización planteado.

### 3.1.2 Estructura de Productos

Una vez completada la fase de Iniciación, y por tanto desarrollados los requisitos de sistema del Sistema de Señalización, la siguiente etapa será la definición de la Estructura de Productos. Las principales actividades de esta etapa son las siguientes:

- Realización de Replanteo en la Instalación a fin de comprobar in situ el emplazamiento físico en que el Sistema de Señalización va a ser instalado y avanzar posibles limitaciones no detectadas hasta el momento que puedan afectar al diseño de los subsistemas de los que se compone el Sistema de Señalización definido.
- Definición de la Arquitectura del Sistema de Señalización, con la identificación de cada uno de los subsistemas que la compondrá, así como las distintas relaciones que entre los subsistemas se establezcan, a fin de garantizar el cumplimiento de los Requisitos de Sistema establecidos.
- Definición de los Interfaces Externos e Internos. Se considerarán como internos los interfaces entre los diferentes subsistemas que componen el Sistema de Señalización y externos, los interfaces entre el Sistema de Señalización y su entorno.



- Identificación de la Estructura de Productos, que compondrán cada uno de los distintos subsistemas a fin de identificar qué productos hardware y software serán los responsables del cumplimiento de los Requisitos de Sistema.

### 3.1.3 Definición de Planes de Proyecto

Una vez completada la fase de Estructura de Productos y teniendo por tanto, una definición de cuáles son los requisitos a desarrollar y qué productos deben satisfacerlos, se desarrollarán los Planes de Proyecto que definirán cuál es la estrategia que permitirá la consecución de los objetivos y qué medios y métodos van a ser utilizados.

Para el desarrollo del Sistema de Señalización, se desarrollarán principalmente los siguientes planes:

- Plan de Proyecto: en el que se detallan cuáles son los principales hitos contractuales del proyecto, se referencia al Organigrama de Proyecto y se definen las responsabilidades de cada una de las áreas de conocimiento implicadas (Proyectos, Ingeniería, Instalaciones, Compras, Contratos, Fabricación, etc.). A su vez, se define la estrategia de comunicación del proyecto y se define la periodicidad con la que el equipo principal de proyecto realizará las correspondientes reuniones y revisión de progreso de acuerdo a la planificación de proyecto definida.
- Plan de Ingeniería. en el que
  - se detalla cuál es la estrategia de ingeniería para el desarrollo del Sistema de Señalización y de acuerdo a qué procesos y procedimientos será desarrollada la ingeniería.
  - se establece el Organigrama de Ingeniería de Proyecto y se define la responsabilidad de cada uno de los responsables de los subsistemas implicados.
  - se define el marco en que la ingeniería va a ser desarrollada consistente en el Sistema de Control de Configuración y el Sistema de Control de Cambios a aplicar.
  - se define la estrategia de comunicación dentro de equipo de ingeniería y la periodicidad con la que el equipo principal de ingeniería realizará las correspondientes reuniones y revisión de progreso de acuerdo a la planificación de proyecto definida.
- Plan de Gestión de la Calidad: en el que se detalla cuál es la estrategia de calidad y qué actividades se llevarán a cabo para el aseguramiento del cumplimiento de los procedimientos y estándares de calidad fijados. Se definirá la periodicidad de las correspondientes auditorías de calidad, así como los indicadores de calidad que se calcularán para el proyecto.
- Plan de Verificación y Validación: en el que se detalla cuál es la estrategia de verificación y validación tanto del Sistema de Señalización integrado como de cada uno de los subsistemas que lo componen. Para ello, se definirán las distintas actividades y métodos con los que tanto el software como el hardware será verificado y validado, así como los responsables de que cada tarea de verificación sea llevada a cabo.



- Plan de Seguridad: en el que se detalla cuál es la estrategia de seguridad para que el nivel de seguridad del Sistema de Señalización y de los distintos subsistemas definido en el contrato pueda ser satisfecho. Para ello, se definirán las distintas actividades de análisis a llevar a cabo por el equipo de seguridad, así como los distintos métodos de análisis y cálculo utilizados.

#### 3.1.4 Diseño Preliminar

Una vez que ha sido definidos los Planes de Proyecto y existe una definición clara de cómo la Ingeniería debe ser desarrollada, pueden comenzar las fases relativas al desarrollo que se inician con la etapa de Diseño Preliminar siendo las principales actividades:

- Desarrollo del Diseño Preliminar consistente en la elaboración de los primeros planos del trazado de vía, equipos a instalar, conexionado preliminar de los equipos, distribución de cables, consumos preliminares de energía, etc.
- Elaboración de la Lista de Materiales Preliminar de acuerdo al Diseño Preliminar realizado a fin de comenzar el aprovisionamiento de materiales de la manera más rápida posible, especialmente de aquellos materiales con plazos de entrega más amplios.

#### 3.1.5 Requisitos Subsistemas

Una vez que la primera fase de Diseño Preliminar ha sido completada, se inicia la fase de desarrollo de Requisitos de Subsistemas, cuyo principal objetivo es la generación de la especificación de requisitos de los distintos subsistemas, que deberán derivarse de los requisitos de sistema previamente establecidos.

Una vez identificados, y de manera análoga al desarrollo del Sistema, se desarrolla la Arquitectura del Subsistema mediante la identificación de cada uno de los productos que compondrán el subsistema, así como las distintas relaciones que entre los productos se establezcan, a fin de garantizar el cumplimiento de los Requisitos de Subsistema establecidos.

#### 3.1.6 Diseño Detallado

Una vez que las distintas especificaciones de Requisitos de Subsistemas, así como las Arquitecturas de los distintos Subsistemas han sido desarrolladas, puede comenzar la fase de Diseño Detallado siendo las principales actividades:

- Desarrollo de las Especificaciones de Diseño Detallado de los distintos subsistemas software y hardware con la especificación de diseño previo detallado a la implementación, que satisfaga los requisitos de subsistema definidos.
- Desarrollo de las Especificaciones de Pruebas de los distintos Subsistemas y del Sistema Integrado con la especificación de los distintos casos de prueba que asegurarán que tanto los requisitos de subsistema como los requisitos de sistema son satisfechos.
- Análisis de Seguridad y RAM (**R**ealiability- **A**vailabilty- **M**antenibility): análisis de seguridad y de fiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad, de acuerdo a las diferentes especificaciones de diseño detallado desarrolladas para cada uno de los subsistemas. Una vez concluido, retroalimentarán a las especificaciones de diseño detallado.





- Finalización Lista de Materiales de acuerdo al diseño detallado de cada uno de los subsistemas, a fin de garantizar que el pedido de materiales es el necesario.
- Realizar la Orden de Compra de acuerdo a la Lista de Materiales final para garantizar el suministro de materiales a tiempo para la instalación del Sistema de Señalización.

#### 3.1.7 Implementación del Software

Una vez que las distintas especificaciones de Diseño Detallado del software han sido desarrolladas, puede comenzar la fase de Implementación del Software de acuerdo a las especificaciones de diseño software desarrolladas en la fase previa, y de acuerdo a las reglas de codificación propias de cada subsistema/código.

#### 3.1.8 Fabricación de Equipos

Una vez que las distintas especificaciones de Diseño Detallado del hardware han sido desarrolladas, puede comenzar la fase de Fabricación de Equipos hardware tales como las cabinas y bastidores que alojan cada uno de los equipos, tarjetas electrónicas, etc.

Antes de la fabricación en serie de cada uno de los equipamientos hardware se realizará un prototipo que se inspeccionará a fin de garantizar que éste satisface los requisitos de diseño. La primera unidad de la serie, será inspeccionada antes de que más unidades sean producidas.

#### 3.1.9 Pruebas de Subsistemas

Una vez que la Implementación del Software y la Fabricación de Equipos Hardware han concluido, puede comenzar la fase de Pruebas de los Subsistemas de manera aislada, de acuerdo a las especificaciones de pruebas desarrolladas en fases anteriores, pudiendo ser éstas realizadas de manera manual o mediante herramientas automáticas.

De manera habitual, el entorno de pruebas en laboratorio necesario para la realización de las pruebas de los distintos subsistemas se realiza mediante simuladores. En el caso de que esto no sea posible, se recurre a la instalación del equipamiento real en laboratorio o se acude a la instalación en caso de ser necesario (por ejemplo, en los casos en los que existe dependencia con las condiciones impuestas por el propio tren).

Al finalizar las pruebas de subsistema, los resultados son plasmados en los correspondientes registros de pruebas, en los que se detallará los casos de prueba con resultado positivo o negativo, así como las conclusiones finales.

#### 3.1.10 Integración y Pruebas de Sistema

Una vez que las Pruebas de los Subsistemas desarrolladas de manera aislada han concluido y siempre que los correspondientes registros de pruebas resultantes de la fase de Pruebas de Subsistemas no lo desaconsejen, puede comenzar la fase de Integración y Pruebas de Sistema consistente en la realización de pruebas sobre el sistema completo de acuerdo a la especificación de pruebas del Sistema Integrado.

Estas pruebas son realizadas tanto en laboratorio mediante la integración del sistema por partes, como en la propia instalación, una vez que el sistema es completamente integrado.



Al finalizar las pruebas de sistema, los resultados son plasmados en el correspondiente registro de pruebas, en los que se detallará los casos de prueba con resultado positivo o negativo, así como las conclusiones finales.

#### 3.1.11 Autorización para la Instalación

Una vez que la fase de Integración y Pruebas del Sistema ha concluido, y que por tanto, todas las actividades de desarrollo, verificación, validación, calidad y seguridad han finalizado, toda la documentación del ciclo de vida del desarrollo es entregada para la solicitud de la Autorización para la Instalación del Sistema de Señalización.

La documentación es analizada por un asesor independiente que comprobará que las evidencias entregadas son suficientes para demostrar que el Sistema de Señalización ha sido desarrollado de acuerdo con los procedimientos y planes de proyecto.

Al finalizar el análisis, las conclusiones son plasmadas en el correspondiente informe con la autorización/desautorización para el comienzo de la fase de instalación del sistema.

#### 3.1.12 Transferecia del Proyecto a Instalaciones

En el caso de que la autorización sea concedida, el proyecto es transferido a Instalaciones, junto con la documentación producida en las distintas fases: especificaciones de requisitos, diseño detallado, registros de pruebas, etc.

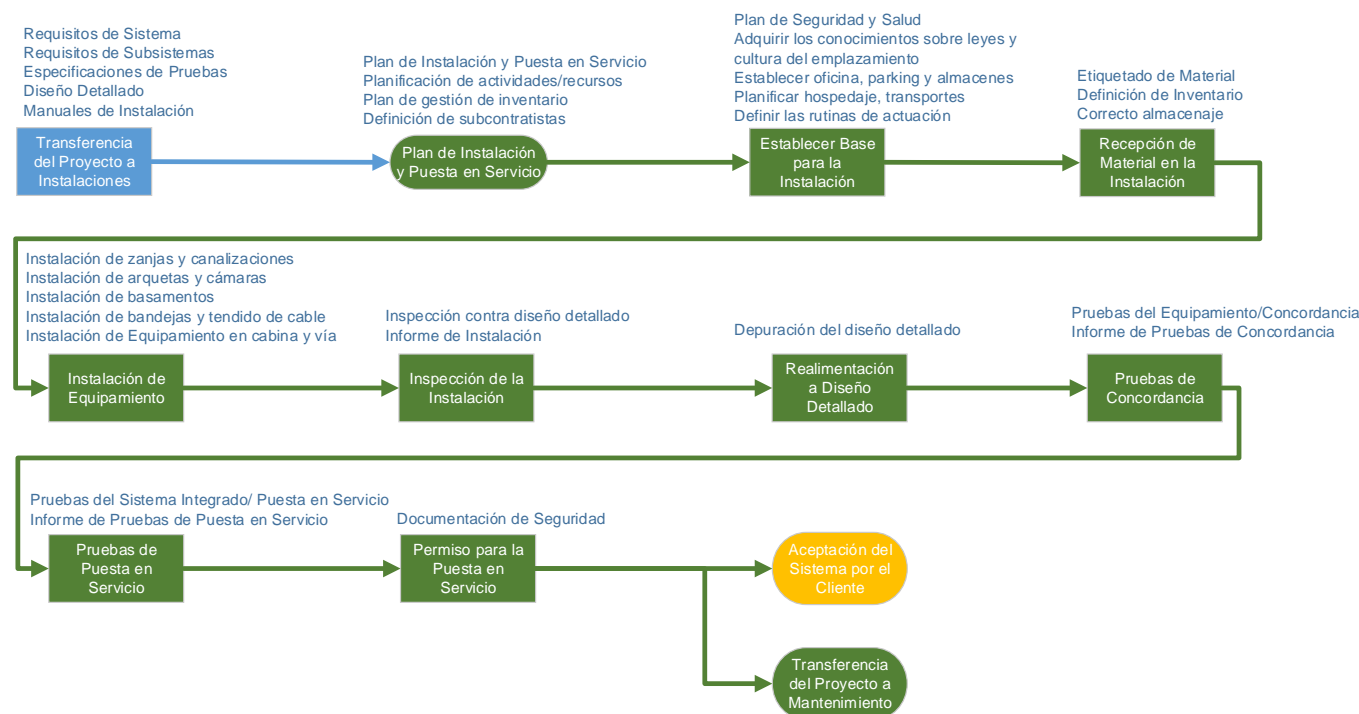
Adicionalmente, en la etapa de transferencia, se hace entrega de todos los manuales de instalación necesarios para que ésta pueda iniciarse.



## 3.2 Etapas en la Instalación y Pruebas de un Sistema de Señalización

La instalación de un sistema de señalización es iniciada una vez que concluye la fase de transferencia del proyecto a instalaciones.

En este punto, se inicia el proyecto de instalación de un Sistema de Señalización que consta de las fases descritas en el esquema adjunto:



*Ilustración 55: Etapas en la Instalación de un Sistema de Señalización*



### 3.2.1 Plan de Instalación y Puesta en Servicio

Una vez que la fase de Transferencia del Proyecto a Instalaciones ha finalizado, y la documentación necesaria ha sido entregada, pueden desarrollarse las distintas etapas de Instalación del Sistema de Señalización. . Las principales actividades de esta etapa son las siguientes:

- Elaboración del Plan de Instalación y Puesta en Servicio, en el que:
  - se detalla cuál es la estrategia para la instalación y puesta en servicio del Sistema de Señalización y de acuerdo a qué procesos y procedimientos será desarrollada.
  - se establece el Organigrama de Instalaciones y Puesta en Servicio y se define la responsabilidad de cada uno de los responsables.
  - se define el marco en que la instalación va a ser desarrollada consistente en el Sistema de Control de Configuración y el Sistema de Control de Cambios a aplicar.
  - se define la estrategia de comunicación dentro de equipo de instalaciones y la periodicidad con la que el equipo realizará las correspondientes reuniones y revisión de progreso de acuerdo a la planificación de instalaciones definida.
- Desarrollo de la Planificación de Instalaciones y Puesta en Servicio: en base a los hitos establecidos por la planificación de proyecto, se desarrollará una planificación detallada de actividades y sus correspondientes inter-relaciones, a las que se les asignarán los correspondientes recursos, responsables de su ejecución.
- Definición del Plan de Gestión del Inventario para el almacenaje de los materiales en la instalación o en los correspondientes emplazamientos.
- Definición de Subcontratistas en el caso de que esto sea necesario.

### 3.2.2 Establecer Base para la Instalación

Una vez que el Plan de Instalación y Puesta en Servicio ha sido elaborado, y existe una planificación para llevar a cabo las actividades asignadas, se puede proceder al establecimiento de una base para la instalación, siendo las principales actividades:

- Elaborar el Plan de Seguridad y Salud en la instalación
- Reconocer el área donde se emplazará la instalación
- Adquirir los conocimientos necesarios sobre las condiciones locales, leyes y cultura donde se instalará el emplazamiento.
- Comprobar que tanto el nivel educacional del personal interno como de los subcontratistas es el adecuado y planificar actividades formativas, si éstas fueran necesarias.
- Establecer el espacio disponible para oficinas, parking, almacenes, etc.
- Establecer las comunicaciones de telefonía y red.
- Planificar hospedajes y transportes a/desde el emplazamiento.
- Preparar la rutinas de actuación para la actividad en la instalación



### 3.2.3 Recepción del Material en la Instalación

Una vez que la Base para la Instalación ha sido establecida, se puede proceder a la recepción de los materiales en la instalación consistente en el desempaquetado, clasificación y correcto identificado de los materiales, de acuerdo a la lista de materiales para asegurar que todo el material está disponible y en perfectas condiciones.

Una vez que el material es recibido, éste se inventaría y se procede a su correcto almacenaje, de acuerdo a los procedimientos establecidos.

Al finalizar la recepción de los materiales, las conclusiones son plasmadas en el correspondiente informe con la aceptación/rechazo para el comienzo de la fase de instalación del equipamiento.

### 3.2.4 Instalación de Equipamiento

Una vez que la Recepción de los Materiales ha concluido o al menos, cuando los mínimos materiales y equipamientos necesarios ya están disponibles, se puede proceder a la Instalación del Equipamiento, siendo las principales actividades:

- Instalación de zanjas y canalizaciones
- Instalación de arquetas y cámaras
- Instalación de basamentos y soportes para señales altas, bajas, armarios y cajas
- Instalación de bandejas para cables
- Tendido de cables
- Montaje e instalación del equipamiento auxiliar en las cabinas de señalización: suelo técnico, climatización, luminarias, sistemas anti-intrusión y video vigilancia.
- Montaje e instalación del equipamiento interior consistente en la instalación de bastidores de los diferentes subsistemas (enclavamiento, sistema de bloqueo móvil por radio, sistema de protección automáticos de tren, etc.), así como los bastidores de distribución de cables, energía, etc. en las cabinas de señalización.
- Montaje e instalación del equipamiento exterior en vía: consistente en la instalación de circuitos de vía, señales, desvíos, balizas, etc.

### 3.2.5 Inspección de la Instalación

Una vez que la fase de Instalación del Equipamiento ha sido completada, la fase de Inspección de la Instalación puede ser iniciada. La inspección es realizada en pequeñas o grandes áreas, siendo los siguientes métodos de inspección los más utilizados:

- Inspección dimensional y/o visual.
- Inspección de tipo Timbrado-Megado
- Mediciones eléctricas/ajustes

Las principales actividades de inspección consistirán en:

- Inspección de la correcta profundidad de zanjas y canalizaciones, así como la ausencia de piedras u objetos punzantes en el lecho de arena cribada



- Inspección de las dimensiones de las arquetas, así como la correcta embocadura de los tubos y tapa. En las cámaras, se inspeccionará el montaje de pates y correcto drenaje.
- Inspección del hormigón del basamento, así como su correcto vertido y vibrado. Tanto en el caso de basamentos como en el caso de soportes, se inspeccionará su posición con respecto a la vía, asegurando que existe suficiente distancia para permitir el paso del tren.
- Inspección de la correcta colocación y alineación de las bandejas para cables.
- Inspección visual del correcto tendido de cables sobre las bandejas, inspección de las correctas dimensiones de los cables tendidos e inspección del correcto sellado de los cables de energía. Todos los cableados y conexiones serán verificados posteriormente mediante un timbrado/megado para verificar su perfecto estado de aislamiento una vez realizado el tendido.
- Inspección de la correcta instalación del equipamiento interior y exterior, realizando un control completo del conjunto, por ejemplo: basamento, soporte, señal y conexionado. Para todos los equipamientos, se realizarán las correspondientes mediciones eléctricas y ajustes necesarios.

Al finalizar la inspección, los resultados son plasmados en el correspondiente registro de inspección, en los que se detallará que inspecciones han resultado positivas y cuáles negativas, así como las conclusiones finales.

#### 3.2.6 Realimentación de Diseño Detallado

Una vez que la fase de Inspección de la Instalación ha sido completada, todos los errores/inconsistencias detectados durante la fase de instalación son reportados a la fase de desarrollo para su corrección y generación de la documentación final (documentación “as built”)

#### 3.2.7 Pruebas de Concordancia

Una vez que la fase de Instalación ha concluido, la fase de Pruebas de Concordancia puede ser iniciada de acuerdo a las especificaciones de pruebas desarrolladas para tal fin.

El objetivo de las pruebas de concordancia será el de comprobar la correcta conexión entre el equipamiento exterior e interior, asegurando la correspondencia entre la información de vía y de cabina.

Al finalizar las pruebas de concordancia, los resultados son plasmados en los correspondientes registros de pruebas, en los que se detallará los casos de prueba con resultado positivo o negativo, así como las conclusiones finales.

#### 3.2.8 Fase de Puesta en Servicio

Una vez que la fase de Pruebas de Concordancia ha concluido, la fase de Pruebas de Puesta en Servicio puede ser iniciada de acuerdo a las especificaciones de pruebas desarrolladas para tal fin.

El objetivo de las pruebas de puesta en servicio será el de comprobar la correcta integración entre el entorno y el Sistema de Señalización.

El cliente asistirá o no a las pruebas de Puesta en Servicio, y tendrá la libertad de sugerir de acuerdo a las condiciones de Puesta en Servicio establecidas en el Plan de Aceptación.





Adicionalmente, se somete al sistema a la operación habitual que llevará a cabo tras la Puesta en Servicio. Estas pruebas se desarrollarán durante un tiempo definido que normalmente varía entre una o dos semanas con el fin de comprobar que ningún fallo adicional relacionado con la operación aparece y con el fin de obtener datos del sistema en funcionamiento normal, comprobar si los requisitos de rendimiento son satisfechos y depurar las herramientas de simulación.

Al finalizar las pruebas de puesta en servicio, los resultados son plasmados en los correspondientes registros de pruebas, en los que se detallará los casos de prueba con resultado positivo o negativo, así como las conclusiones finales.

### 3.2.9 Autorización para la Puesta en Servicio Comercial

Una vez que la fase de Pruebas de Puesta en Servicio ha concluido, y que por tanto, todas las actividades de instalación y pruebas han finalizado, toda la documentación es entregada para la solicitud de la Autorización para la Puesta en Servicio del Sistema de Señalización.

La documentación es analizada por un asesor independiente que comprobará que las evidencias entregadas son suficientes para demostrar que el Sistema de Señalización ha sido instalado y probado de acuerdo con los procedimientos y planes de proyecto.

Al finalizar el análisis, las conclusiones son plasmadas en el correspondiente informe con la autorización/desautorización para la aceptación del sistema por el cliente.

### 3.2.10 Aceptación del Sistema por el cliente

En el caso de que la autorización sea concedida, el Sistema de Señalización está preparado para la aceptación del mismo por parte del cliente.

El proceso de aceptación se realizará de acuerdo al Plan de Aceptación del Sistema de Señalización, en el que normalmente se definen unas pruebas mínimas de aceptación a realizar en la instalación con el Sistema de Señalización integrado, antes de la aceptación y recepción del Sistema. Igualmente, se definirá la formación necesaria a recibir por los operadores de la línea y ésta deberá ser impartida por la empresa de señalización.

Una vez que estas pruebas han sido realizadas y la correspondiente formación es recibida, de acuerdo a los criterios definidos en el Plan de Aceptación, el cliente tomará la decisión aceptando/rechazando la entrega del Sistema de Señalización.

Si el sistema es aceptado, el cliente inaugura el Sistema de Señalización y éste es puesto en servicio para operación comercial con viajeros.

### 3.2.11 Transferencia del Proyecto a Mantenimiento

En el caso de que la autorización sea concedida, el proyecto es transferido a Mantenimiento, junto con la documentación producida en las distintas fases: especificaciones de requisitos, diseño detallado, registros de instalación, registros de pruebas, etc.

Adicionalmente, en la etapa de transferencia, se hace entrega de todos los manuales de mantenimiento necesarios para que éste pueda iniciarse.



### 3.3 Actividades de Mantenimiento de un Sistema de Señalización

Las actividades de mantenimiento del sistema de señalización tienen como finalidad asegurar que el sistema cumpla los requisitos de fiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad fijados siendo:

- **Fiabilidad (*Reliability*)** la característica de un equipo expresada por la probabilidad de que funcione adecuadamente durante un periodo determinado bajo condiciones operativas específicas.
- **Disponibilidad (*Availability*)** la característica de un equipo expresada por la probabilidad de un equipo de estar listo para el funcionamiento en el momento requerido.
- **Mantenibilidad (*Maintenability*)** la característica de un equipo expresada por la probabilidad de ser recuperado para el servicio cuando se realiza la tarea de mantenimiento requerida.

Para el alcance de los requisitos de fiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad fijados, se desarrolla un Plan de Mantenimiento del sistema de señalización, con las actividades a realizar, la duración, los procedimientos y los recursos humanos y materiales necesarios para ejecutar el mantenimiento.

Para cada uno de los equipos se desarrollará una estrategia de mantenimiento, que dependerá del tipo de equipo y de su curva de fallo. Los tipos de curvas de fallos utilizados en los sistemas de señalización ferroviarios están basados en los datos de fiabilidad de la aviación civil y de la marina norteamericana contrastados con la experiencia en mantenimiento de equipos electrónicos de señalización en líneas ferroviarias.

En el caso de equipos simples, (curvas A y E) con componentes estructurales que pueden estar sometidos a fatiga de materiales o a fatiga mecánica, como por ejemplo, un accionamiento de desvío, su vida útil depende del tiempo de operación y de los esfuerzos a los que está sometido por lo que la estrategia de mantenimiento deberá ir encaminada a la sustitución periódica del equipo.

Sin embargo, en el caso de equipos electrónicos complejos (curvas B y D), como por ejemplo, el enclavamiento electrónico o el sistema de protección automático de tren, la vida útil no depende del tiempo de operación, y en la mayoría de los casos se desaconseja reemplazar equipos de manera preventiva para evitar introducir fallos en sistemas estables.

Una vez identificado el tipo de equipo, en el Plan de Mantenimiento se identificarán tanto actividades de mantenimiento preventivo como actividades de mantenimiento correctivo, siendo finalmente la estrategia de mantenimiento de cada equipo, el resultado de la combinación de ambas.

En los siguientes capítulos se detallarán las distintas actividades de mantenimiento preventivo y correctivo típicas de un sistema de señalización.

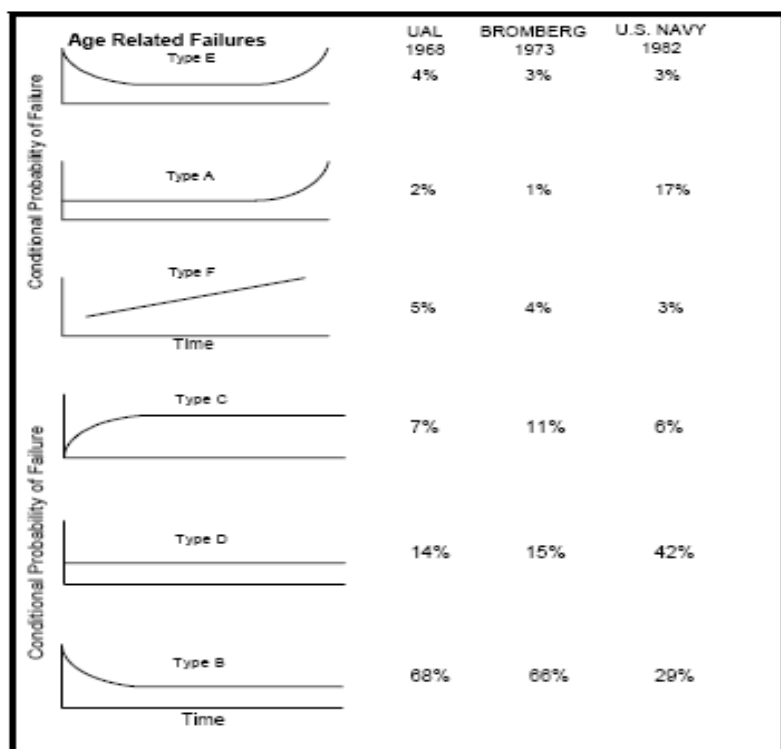


Ilustración 56: Tipos de Curvas de Fallo

### 3.3.1 Mantenimiento Preventivo

El mantenimiento preventivo se define como el conjunto de tareas de mantenimiento necesarias para prevenir la aparición de un fallo. Las acciones preventivas son realizadas en paros programados y bajo condiciones controladas que minimizan los tiempos muertos y el efecto negativo sobre la operación, lo que redundará en una mejora de la calidad en la reparación.

Existen distintas técnicas de mantenimiento preventivo que serán desarrolladas en los siguientes capítulos.

#### 3.3.1.1 Mantenimiento Cíclico Programado

La finalidad del mantenimiento preventivo cíclico es evitar que aquellos componentes, piezas u otros materiales con una duración/ajuste determinada, sufran un fallo, realizando las inspecciones, ajustes, medidas, limpiezas y sustituciones necesarias, que garanticen los niveles de fiabilidad y disponibilidad requeridos.

En los equipos ajustables, esto se consigue manteniendo periódicamente los parámetros dentro de las tolerancias permitidas, mientras que en los equipos de duración limitada, esto se consigue, con la sustitución del componente/equipo.

La periodicidad de estas tareas viene definida por los fabricantes de los equipos y es optimizada en base a la experiencia adquirida durante el mantenimiento de los mismos.



A partir de los datos de periodicidad de las tareas, se realizará la programación de las mismas, en un sistema informático de gestión del mantenimiento, que elaborará los correspondientes partes de trabajo que se completarán una vez que la tarea haya sido llevada a cabo junto con el resultado de la misma.

#### 3.3.1.2 Mantenimiento Preventivo según Estado

La finalidad del mantenimiento preventivo según estado es evitar la aparición de un fallo mediante la intervención en un equipo, en base al estado en el que se encuentra.

Para ello, durante las reuniones de mantenimiento, los especialistas de mantenimiento alertan del estado de un determinado equipo al más mínimo síntoma de anomalía o avería, con el fin de que las brigadas de mantenimientos realicen las pertinentes tareas preventivas.

#### 3.3.1.3 Mantenimiento Preventivo Predictivo

La finalidad del mantenimiento preventivo predictivo es evitar la aparición de un fallo mediante la intervención en un equipo en base a la medición periódica o continua de algún parámetro significativo.

Esta forma de mantenimiento está apoyada en un sistema informático de gestión del mantenimiento que realiza el procesamiento de toda la información permitiendo su evaluación.

Durante las fases iniciales del mantenimiento, se comienza la recogida sistemática de datos de referencia (temperatura, consumo, etc.) que son introducidos en el sistema, junto con datos históricos de equipos similares en entornos semejantes, que serán fijados como los datos de referencia y permitirán comparar los datos adquiridos a lo largo del tiempo.

Una vez realizada la comparación, el sistema informático alertará de la existencia de alarmas, y la gravedad de las mismas, con lo que será posible realizar una intervención preventiva antes de que el fallo realmente ocurra.

#### 3.3.1.4 Mantenimiento Preventivo Extraordinario

La finalidad del mantenimiento preventivo extraordinario es evitar la aparición de un fallo mediante la sustitución de un componente/equipo al finalizar su vida útil.

Para ello, la vida útil de los componentes y equipos es registrada y antes de su finalización, el componente/equipo es sustituido a fin de prevenir un fallo que afecte a la operación del sistema.

#### 3.3.2 Mantenimiento Correctivo

El mantenimiento correctivo se define como el conjunto de tareas de mantenimiento necesarias una vez que el fallo ya ha ocurrido. Las acciones correctivas tienen como finalidad restaurar un componente/equipo al estado de fiabilidad y disponibilidad requerido.

Dentro de este mantenimiento correctivo se considerarán dos tipos de intervenciones:

- **Intervención paliativa:** cuando se realiza una reparación de urgencia, no definitiva, motivada normalmente por la necesidad de un rápido restablecimiento del servicio.
- **Intervención resolutive:** cuando se realiza una reparación con la profundidad necesaria como para darle el carácter de definitiva.



Existen distintas técnicas de mantenimiento correctivo que serán desarrolladas en los siguientes capítulos.

### 3.3.2.1 Mantenimiento Correctivo derivado del Preventivo

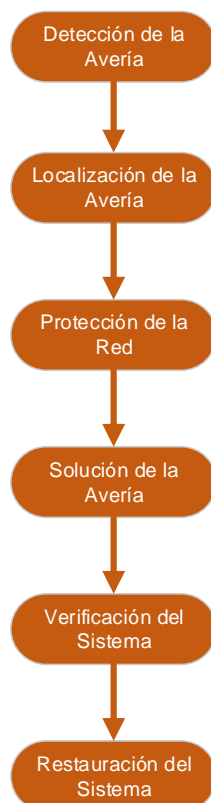
Se denomina mantenimiento correctivo derivado del preventivo a todas aquellas tareas de mantenimiento correctivo que se realizan cuando son detectadas anomalías en el normal funcionamiento de los equipos durante el mantenimiento preventivo de los mismos.

Este mantenimiento correctivo es la base fundamental del mantenimiento preventivo, y aportará a los responsables de mantenimiento la experiencia necesaria para planificar un mantenimiento predictivo adecuado para cada uno de los equipos.

### 3.3.2.2 Mantenimiento Correctivo en caso de Avería

Se denomina mantenimiento correctivo en caso de avería a todas aquellas tareas de mantenimiento que se realizan una vez que el fallo o avería ya se ha producido.

En caso de avería o fallo en un componente/equipo, la secuencia en que el mantenimiento correctivo es llevado a cabo es el siguiente:



*Ilustración 57: Etapas Mantenimiento Correctivo en caso de Avería*

La secuencia se inicia con la detección de la avería por el personal de mantenimiento a través de las inspecciones o a través de los sistemas informáticos de mantenimiento que alertan al personal de mantenimiento sobre la existencia de avería o anomalías.



Una vez que la avería ha ido detectada, se procede a la correcta localización del origen de la misma para tratar de identificar cuál es el componente/equipo que realmente presenta un fallo.

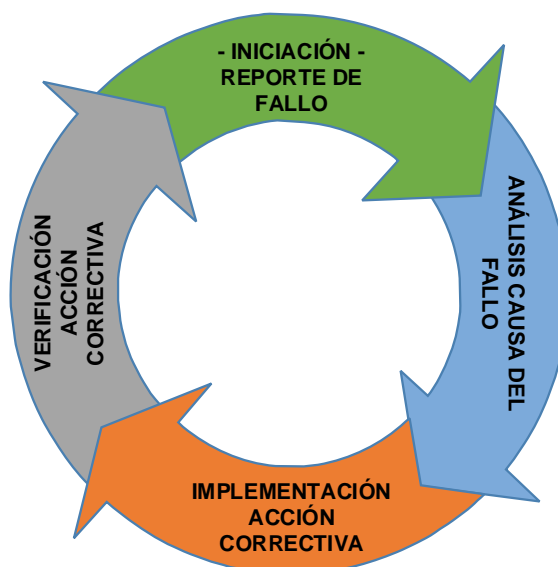
Antes de proceder a la reparación de la avería, se comunica la existencia de la misma al Centro de Control de Tráfico que procede a la protección de la red ferroviaria, impidiendo el tráfico de trenes sobre una parte del trazado, o sobre la línea completa, si esto fuera necesario.

Una vez que la red ferroviaria ha sido protegida, el personal de mantenimiento procede a la reparación de la avería con los parámetros de mantenibilidad requeridos (tiempo medio de reparación). Tras la solución de la avería, el sistema es verificado para garantizar las correctas condiciones de operación.

Una vez que el sistema ha sido verificado, se comunica al Centro de Control de Tráfico que la avería ha sido resuelta, y el Centro de Control de Tráfico retira las limitaciones impuestas en la red ferroviaria, en el caso de que esto haya sido necesario y restaura la operación normal del sistema.

### 3.3.3 Sistema de Reporte de Fallos y Acciones Correctivas - FRACAS

El sistema FRACAS, *Failure Reporting and Corrective Action System*, es un sistema de realimentación cerrado en el que mediante el reporte y análisis de fallos y posterior implementación de acciones correctivas y verificación de las mismas, se previene la aparición de fallos recurrentes.



*Ilustración 58: Etapas Sistema FRACAS*

El sistema se inicia en las fases de desarrollo en el que se anticipan los posibles fallos del Sistema de Señalización, y continúa durante las fases de mantenimiento y garantía en las que el sistema FRACAS es alimentado mediante la identificación de fallos reales.





El objetivo del sistema FRACAS es aumentar la disponibilidad a lo largo de todo el ciclo de vida y para ello, es necesaria una colaboración cercana entre el suministrador del sistema de señalización y el cliente del mismo, con objeto de obtener todos los datos reales posibles e implementar y verificar las acciones correctivas.

El impacto de las acciones correctivas, una vez identificadas las causas de fallo potencial son mayores durante las fases de diseño, ya que éste no se encuentra cerrado, y estas acciones correctivas pueden ser aplicadas con gran flexibilidad incluso eliminando la causa del fallo. Sin embargo, en las fases de mantenimiento y garantía, la flexibilidad es menor, pero las acciones correctivas pueden también disminuir significativamente la probabilidad de aparición del fallo.

A continuación, se detallarán las distintas fases del proceso FRACAS.

#### 3.3.3.1 Iniciación – Reporte del Fallo

El sistema FRACAS es iniciado con la identificación de un fallo. El fallo es reportado en un sistema informatizado de gestión siendo fundamental en esta fase que toda la información disponible sea adjuntada.

Normalmente, el personal de mantenimiento es el primero en identificar el fallo, por lo que éstos deben a ver sido formados adecuadamente acerca del uso del sistema informático y de la información que es necesaria para analizar los distintos tipos de fallo.

Adicionalmente, durante la introducción del fallo en el sistema informatizado de gestión, la severidad del fallo debe ser categorizada siendo posibles categorías: catastrófico, severo, moderado, sin importancia, etc. Esto, permitirá priorizar el análisis de los fallos por severidad y así proceder antes al análisis de los fallos más importantes.

#### 3.3.3.2 Análisis del Fallo

Una vez que el fallo ha sido reportado, se puede proceder al análisis de la causa del mismo. Para ello, los datos recibidos son verificados y analizados para tratar de descubrir la causa del fallo y cualquier otra causa secundaria que contribuya a la aparición del mismo.

El análisis del fallo es normalmente realizado por un grupo multidisciplinar, que incluye tanto ingenieros de diseño o de sistemas, como personal de mantenimiento, calidad y disponibilidad para tratar de realizar el análisis de la causa del fallo, de la manera más completa posible.

Las técnicas usadas en el análisis de la causa de fallo son variadas e incluyen métodos como:

- Brainstorming
- Diagramas de Flujo
- Diagramas de Pareto
- FMEA *Failure Modes and Effect Analysis*
- FMECA, *Failure Modes and Effect Critical Analysis*
- Fault Tree Analysis
- Diagramas de Causa - Efecto



Una vez que la causa del fallo es identificada, distintas acciones correctivas son propuestas y será responsabilidad del equipo multidisciplinar de análisis, la elección de aquellas acciones más efectivas que eliminen o reduzcan las causas del fallo.

#### 3.3.3.3 Implementación Acción Correctiva

Una vez que la acción o acciones correctivas han sido decididas, éstas pueden ser implementadas. Para ello, se desarrollará un plan de implementación de las acciones correctivas que deberá ser aprobado por el cliente del Sistema de Señalización.

#### 3.3.3.4 Verificación Acción Correctiva

Una vez que la acción correctiva ha sido implementada, se procederá a su verificación con el fin de comprobar que ciertamente elimina o reduce la causa del fallo y que no introduce nuevas causas de fallo.

Los datos obtenidos durante la verificación son introducidos en el sistema informatizado de gestión para alimentar al sistema FRACAS y cerrar así el proceso.

### 3.4 Criterios de Selección de un Sistema de Señalización

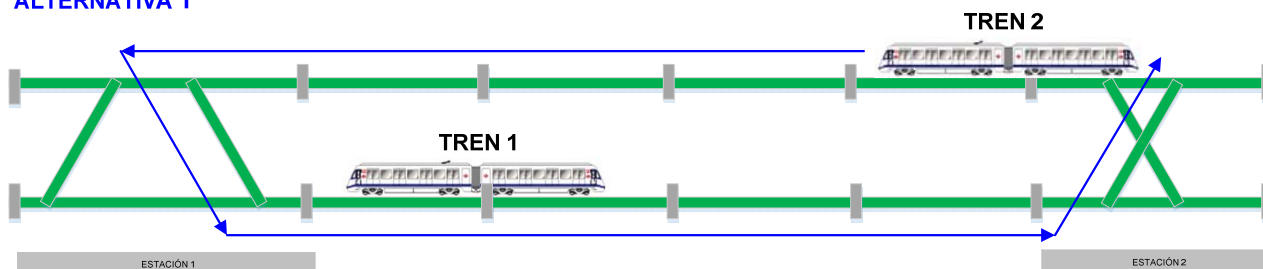
#### 3.4.1 Capacidad

Se define como Capacidad al número de trenes que pueden operar en una línea metropolitana simultáneamente.

La capacidad de un Sistema de Señalización es obtenida en base al parámetro Headway, que se define como el tiempo medio entre dos trenes consecutivos. Este parámetro depende principalmente de factores tales como el tipo de cantonamiento de la línea, la máxima velocidad de la línea, el tiempo de vuelta en estaciones término y del tiempo de parada en las estaciones para la descarga de pasajeros, por lo que en base a estos factores, se estudian distintas alternativas, a fin de definir la mejor operativa.

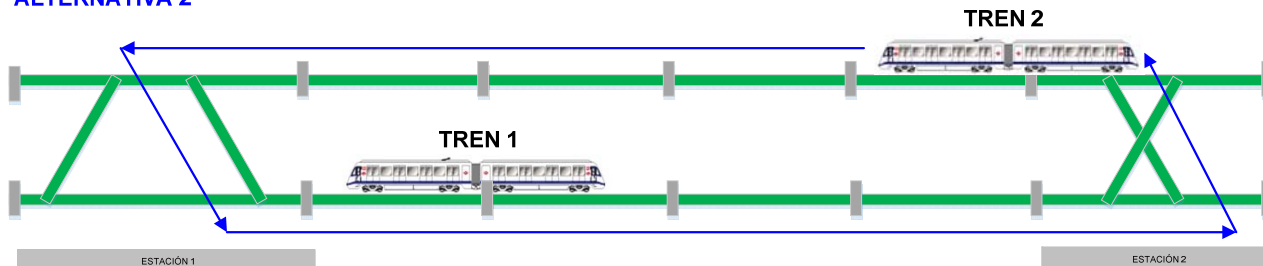
Una vez calculado el Headway de la línea, es posible calcular en base a una operativa definida, el número de trenes que pueden operar al mismo tiempo y por tanto, la capacidad.

##### ALTERNATIVA 1



*Ilustración 59: Vuelta - Alternativa 1*

##### ALTERNATIVA 2



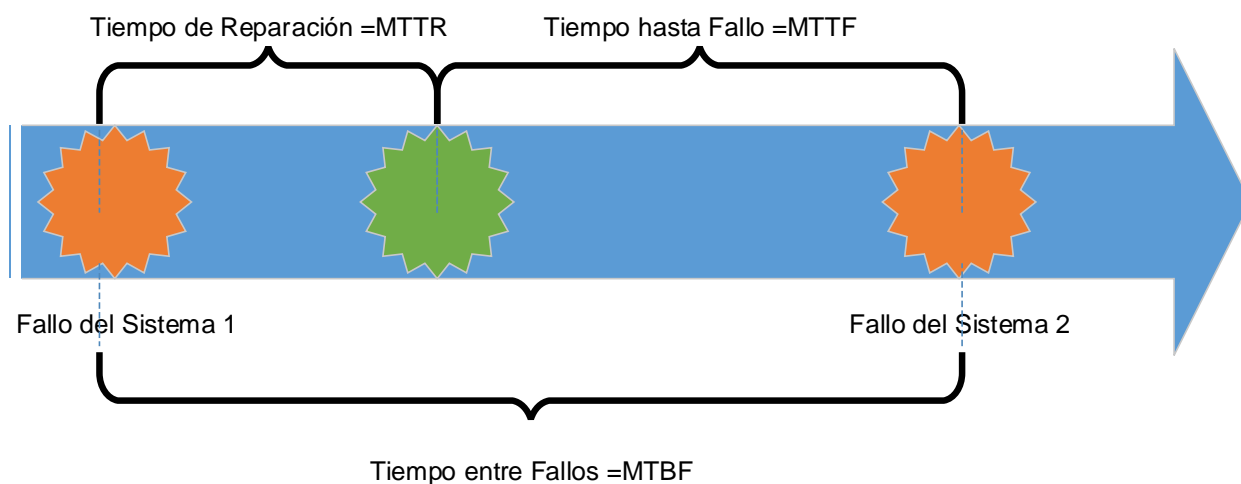
*Ilustración 60: Vuelta - Alternativa 2*

#### 3.4.2 Fiabilidad

Se define como Fiabilidad a la característica de un equipo expresada por la probabilidad de que funcione adecuadamente durante un periodo determinado bajo condiciones operativas específicas.

La fiabilidad de un Sistema de Señalización es expresada en tiempo a través del parámetro MTBF, **Mean Time Between Failures**, es decir, el tiempo medio entre fallos consecutivos, que se expresa como:

$$MTBF = \frac{TIEMPO\_TOTAL\_DE\_OPERACION}{NÚMERO\_DE\_FALLOS}$$



*Ilustración 61: Tiempo Medio entre Fallos (MTBF)*

Tanto el parámetro MTBF como el parámetro MTTF, **Mean Time to Fail**, de cada uno de los componentes del Sistema de Señalización forman parte de la base de datos RAM de cada empresa de señalización y se corresponden con datos históricos obtenidos a lo largo de numerosas horas de operación.

### 3.4.3 Mantenibilidad

Se define como Mantenibilidad la característica de un equipo expresada por la probabilidad de ser recuperado para el servicio cuando se realiza la tarea de mantenimiento requerida.

La mantenibilidad de un Sistema de Señalización es expresada en tiempo a través del parámetro MTTR, **Mean Time to Repair**, es decir, el tiempo medio de reparación, que se expresa como:

$$MTTR = \frac{TIEMPO\_TOTAL\_DE\_REPARACIÓN}{NÚMERO\_DE\_FALLOS}$$

El parámetro MTTR de cada uno de los componentes del Sistema de Señalización forma parte de la base de datos RAM de cada empresa de señalización y se corresponden con datos históricos obtenidos a lo largo de numerosas intervenciones de mantenimiento.

### 3.4.4 Disponibilidad

Se define como Disponibilidad la característica de un equipo expresada por la probabilidad de un equipo de estar listo para el funcionamiento en el momento requerido.



La disponibilidad de un Sistema de Señalización es expresada en porcentaje a través del parámetro A, **A**availability, que se expresa como:

$$A = \frac{TIEMPO\_TOTAL\_DE\_OPERACION}{TIEMPO\_TOTAL} = \frac{MUT}{MUT + MDT}$$

siendo: MUT, el parámetro; **M**ean **U**p **T**ime, o tiempo total de operación y MDT, el parámetro **M**ean **D**own **T**ime, o tiempo de interrupción de servicio, que puede ser expresado en términos de fiabilidad y mantenibilidad como:

$$A = \frac{MUT}{MUT + MDT} = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR}$$

#### 3.4.5 Coste

Se define como Coste al dinero estimado tanto en medios materiales como humanos, necesarios para ejecutar las tareas de gestión, desarrollo, instalación y mantenimiento del proyecto de señalización.

El coste total del Sistema de Señalización se calcula en base al sumatorio de todos los costes materiales y humanos de cada uno de los subsistemas que lo componen más los costes derivados de la integración del propio Sistema.



## 4 CAPÍTULO 4: MODELIZACIÓN DEL SISTEMA DE SEÑALIZACIÓN

En el capítulo que se desarrolla a continuación se detallarán las características de los Sistemas de Señalización de Cantón Fijo y Cantón Móvil que permitirán la modelización de ambas soluciones de señalización.

Estas características, serán divididas en los siguientes capítulos que recogen todos los parámetros necesarios a introducir en el programa de simulación para la modelización de ambas soluciones:

- Características del trazado de vía, consistente en:
  - Definición de la Longitud y el número de Estaciones de la Línea
  - Definición del Trazado de Vía
  - División en Áreas de Control
  - Definición de la Restricción Civil de Velocidad del trazado de vía
  - Definición del Radio de Curvatura del trazado de vía
  - Definición del Gradiente del trazado de vía
- Características del tren, consistente en:
  - Parámetros básicos
  - Parámetros operacionales
  - Esfuerzo de Tracción
  - Resistencia Aerodinámica
- Características de la Solución de Señalización, consistente en:
  - Condiciones para la circulación del tren con respecto al tren precedente

### 4.1 Características del Trazado de Vía

#### 4.1.1 Definición de la Longitud y el número de Estaciones de la Línea

La línea a modelizar constará de las siguientes características generales:

- Longitud = **19 km**
- Estaciones = **12 Estaciones**





#### 4.1.2 Definición del Trazado de Vía

En el caso de tratarse de un Sistema de Señalización de Cantón Fijo, el trazado será modelizado utilizando un Sistema de Señalización en vía consistente en: circuitos de vía para la detección de tren, señales luminosas, para la autorización del progreso del tren, desvíos, para el cambio de vías y balizas de posicionamiento para las paradas de precisión en los andenes de las estaciones.

En el caso de tratarse de un Sistema de Señalización de Cantón Móvil, el trazado será modelizado utilizando un Sistema de Señalización en vía consistente en los desvíos, para el cambio de vías, balizas de posicionamiento para las paradas de precisión en los andenes de las estaciones y la relocalización del tren en desvíos en inter-estaciones de larga distancia y en las unidades de radio para el intercambio de información entre el Sistema de Señalización en Vía y el Sistema de Señalización Embarcado. Tanto los circuitos de vía como las señales luminosas serán eliminados del trazado y en su lugar se utilizará para la detección del tren, la ocupación virtual, y para la autorización del progreso, señales virtuales, que permitirán subdividir la línea a nivel virtual.

En los planos adjuntos a continuación, se define tanto el trazado del Sistema de Cantón Fijo como el trazado del Sistema de Señalización de Cantón Móvil.

#### 4.1.3 División en Áreas de Control

En ambas soluciones de señalización, los elementos del Sistema de Señalización en vía serán controlados por las correspondientes unidades del Sistema Controlador de Elementos de Vía.

En el caso de tratarse de un Sistema de Señalización de Cantón Fijo, el número de Sistemas Controladores necesarios para el control de los elementos que componen el trazado será doce. A su vez, estos controladores, serán supervisados por dos Unidades Centrales de Procesamiento.

En el caso de tratarse de un Sistema de Señalización de Cantón Móvil, el número de Sistemas Controladores necesarios para el control de los elementos que componen el trazado, se ve disminuido, por ser solamente necesario el control de los desvíos, y el trazado puede ser controlado por cuatro Sistemas Controladores. A su vez, estos controladores, serán igualmente supervisados por dos Unidades Centrales de Procesamiento. En el caso de esta solución de señalización, las áreas de control de las Unidades Centrales de Procesamiento se corresponderán con las áreas de control del Sistema de Bloqueo Móvil por Radio.

En los planos adjuntos a continuación, se define tanto la distribución de los Sistemas Controladores para el Sistema de Señalización de Cantón Fijo como para el Sistema de Señalización de Cantón Móvil, así como la distribución de las Unidades Centrales de Procesamiento para ambas soluciones.

#### 4.1.4 Definición de la Restricción Civil de Velocidad del Trazado de Vía

En ambas soluciones de señalización, existirá una restricción civil de velocidad determinada por el trazado de la vía. Esta restricción, implicará la velocidad máxima en que el tren podrá circular en cada punto.

En los planos adjuntos a continuación, se define esta restricción civil que será utilizada para la modelización tanto del Sistema de Señalización de Cantón Fijo como del Sistema de Señalización de Cantón Móvil.



#### 4.1.5 Definición del Radio de Curvatura del Trazado de Vía

En ambas soluciones de señalización, existirá un radio de curvatura determinado por el trazado de la vía.

En los planos adjuntos a continuación, se define este radio de curvatura que será utilizado para la modelización tanto del Sistema de Señalización de Cantón Fijo como del Sistema de Señalización de Cantón Móvil.

#### 4.1.6 Definición del Gradiente del Trazado de Vía

En ambas soluciones de señalización, existirá un gradiente determinado por el trazado de la vía.

En los planos adjuntos a continuación, se define este gradiente que será utilizado para la modelización tanto del Sistema de Señalización de Cantón Fijo como del Sistema de Señalización de Cantón Móvil.

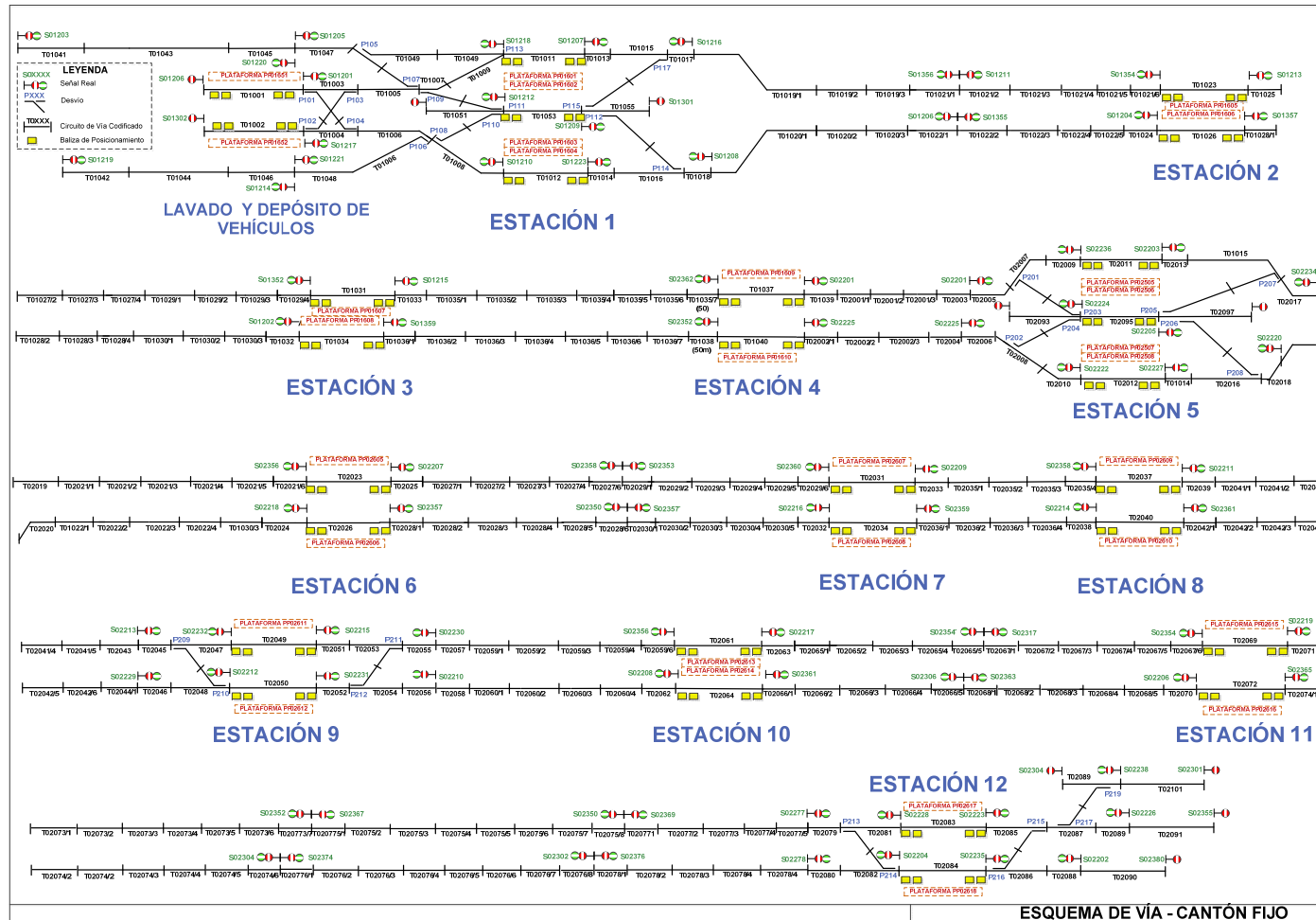


Ilustración 62: Esquema de Vía - Cantón Fijo

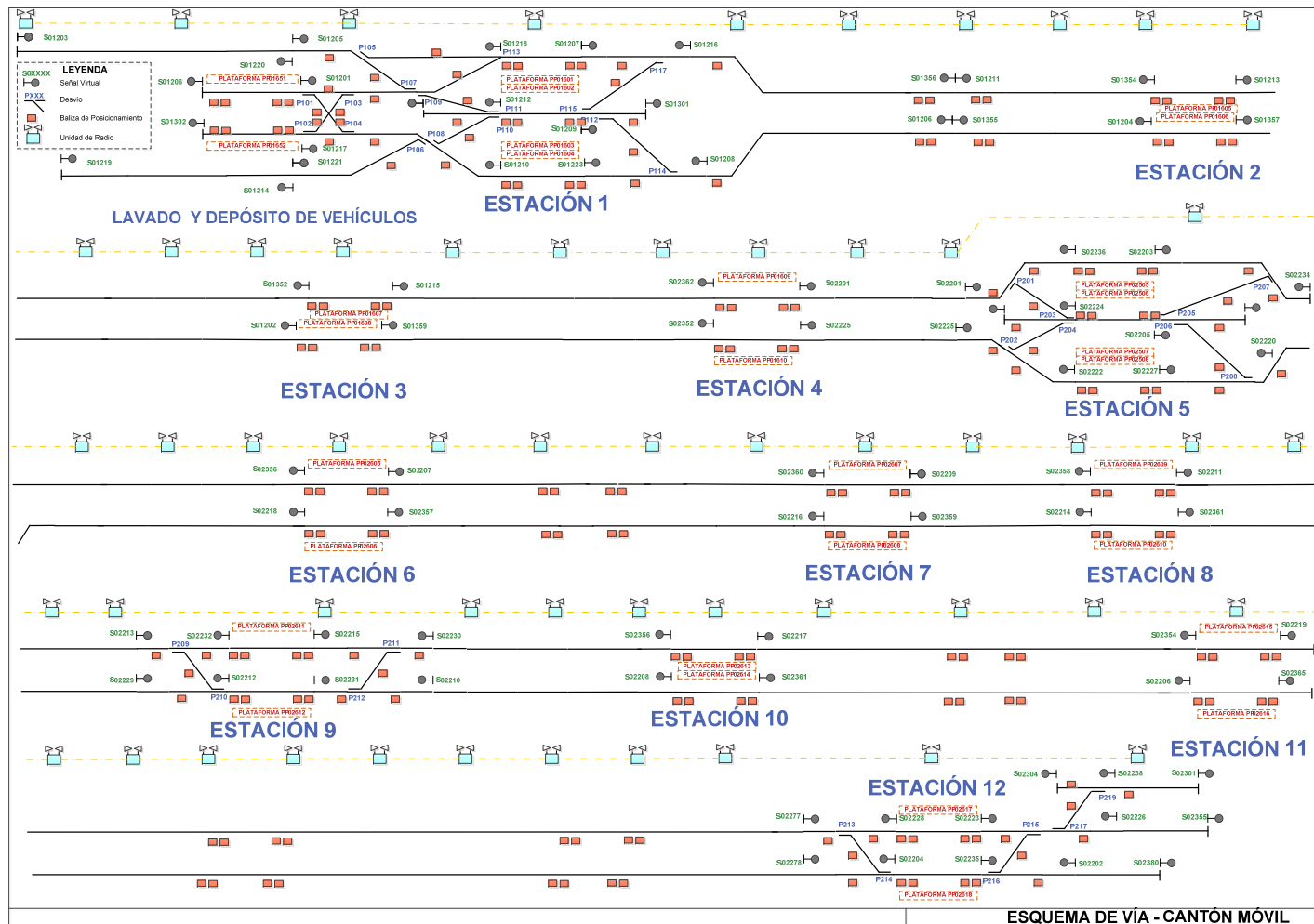


Ilustración 63: Esquema de Vía - Cantón Móvil



Diagrama de distribución de sistemas controladores para el Cantón Fijo. El diagrama muestra una red de 11 sistemas controladores, cada uno con su propia configuración de sensores (S) y actuadores (P). Los sensores y actuadores están representados por símbolos de interruptor con una 'S' o una 'P' respectivamente. Los sistemas controladores están coloreados y etiquetados como SISTEMA CONTROLADOR 1 (naranja), SISTEMA CONTROLADOR 2 (azul), SISTEMA CONTROLADOR 3 (verde), SISTEMA CONTROLADOR 4 (gris), SISTEMA CONTROLADOR 5 (púrpura), SISTEMA CONTROLADOR 6 (azul claro), SISTEMA CONTROLADOR 7 (verde claro), SISTEMA CONTROLADOR 8 (amarillo), SISTEMA CONTROLADOR 9 (púrpura oscuro), SISTEMA CONTROLADOR 10 (naranja), SISTEMA CONTROLADOR 11 (verde claro) y SISTEMA CONTROLADOR 12 (gris). Las plataformas de prueba (PLATAFORMA PRUEBA) están indicadas en varios puntos de la red.

**Ilustración 64: Distribución Sistema Controlador Cantón Fijo**



**Ilustración 65: Distribución Sistema Controlador Cantón Móvil**



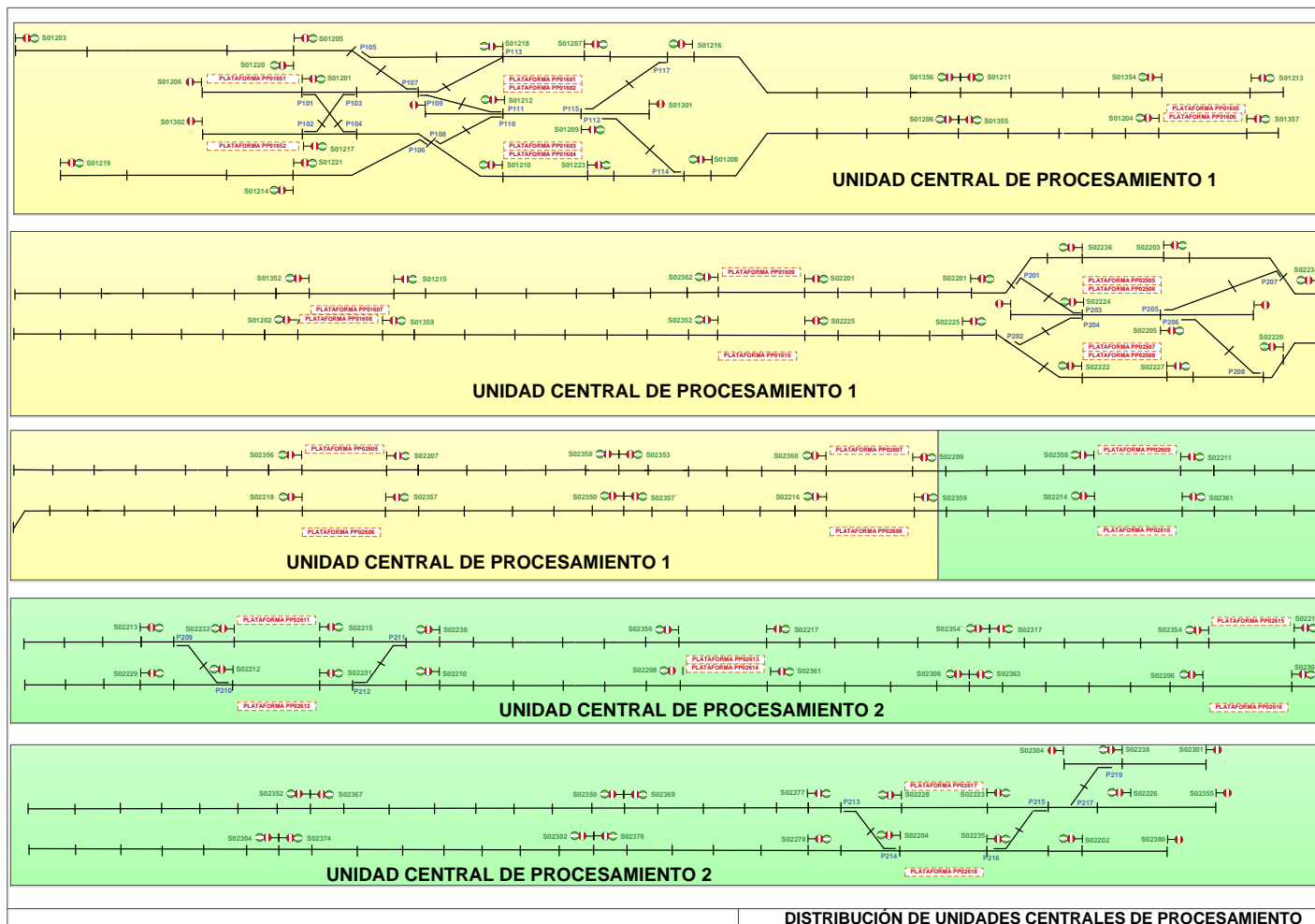
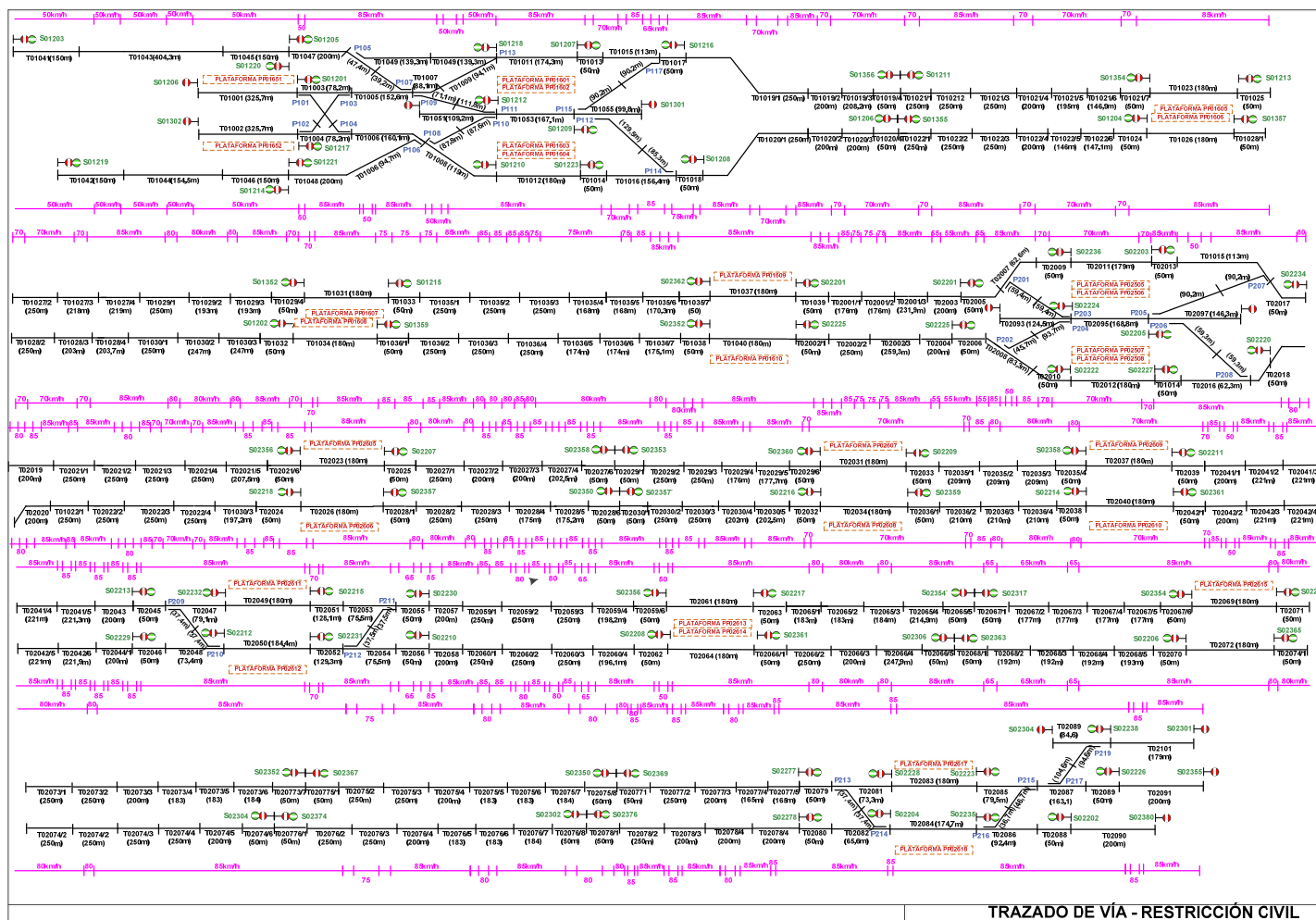


Ilustración 66: Distribución de Unidades Centrales de Procesamiento



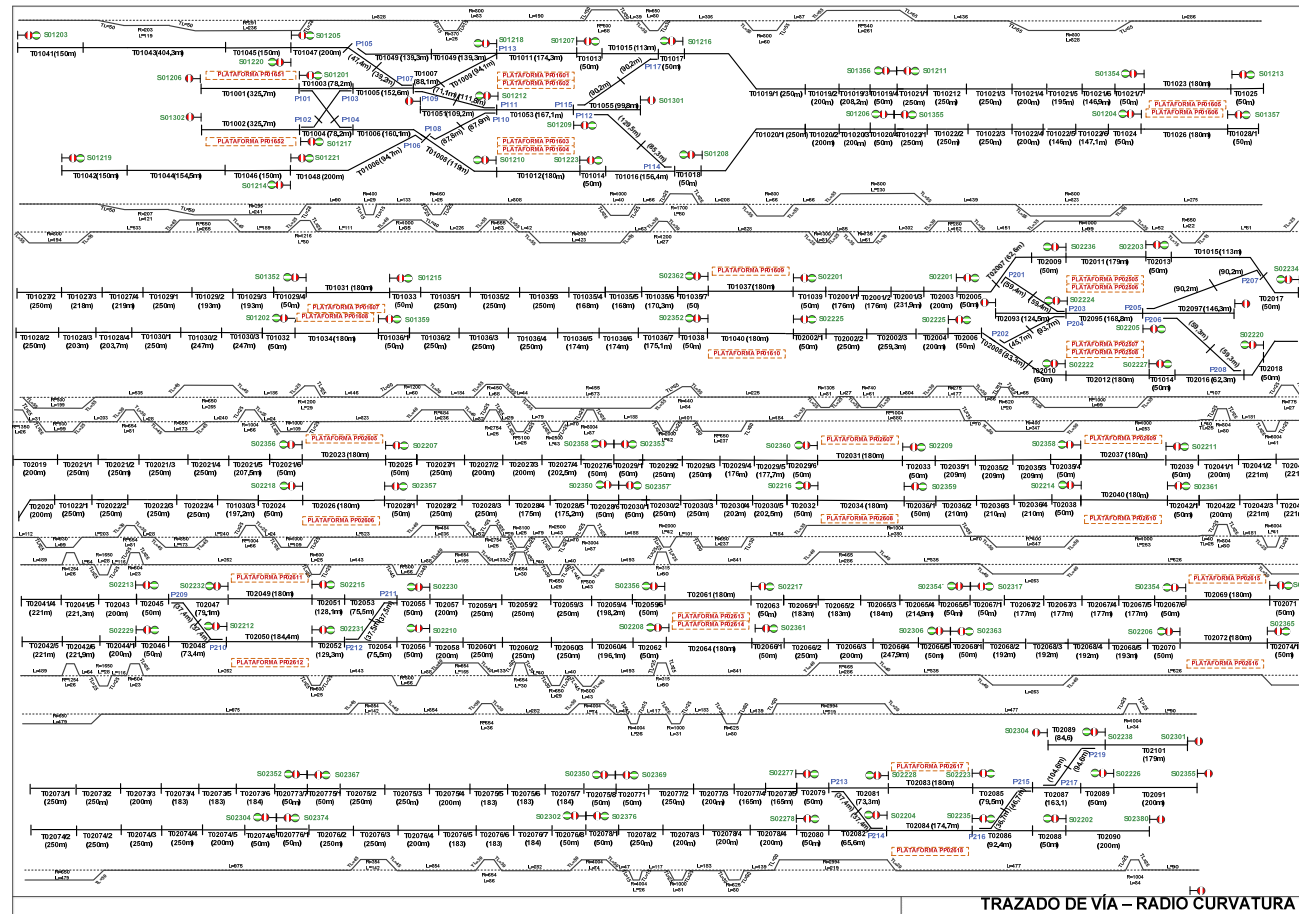
## PROYECTO FIN DE CARRERA: Estudio Comparativo Sistema de Señalización de Metro Cantón Fijo frente a Cantón Móvil

## CAPITULO 4: MODELIZACIÓN DEL SISTEMA DE SEÑALIZACIÓN



TRAZADO DE VÍA - RESTRICCIÓN CIVIL

Ilustración 67: Trazado de Vía - Restricción Civil



TRAZADO DE VÍA – RADIO CURVATURA

Ilustración 68: Trazado de Vía - Radio de Curvatura



## 4.2 Características del Tren

En ambas soluciones de señalización, el tren a utilizar será el mismo, permitiendo así la comparación real de ambas soluciones. En el siguiente capítulo se describen los parámetros que permiten la modelización del tren.

### 4.2.1 Parámetros básicos

En los datos adjuntos a continuación, se definen los parámetros básicos del tren a utilizar:

| Característica     | Valores  | Descripción  |
|--------------------|--|--|
| Número de vagones  | 6 vagones  | -  |
| Longitud del tren  | 136 m  | -  |
| Peso del tren      | AW0=251885 toneladas<br>AW1 =272425 toneladas<br><b>AW2 =371425 toneladas</b><br>AW3 =400085 toneladas | Peso de tren sin pasajeros (en vacío)<br>Peso del tren con pasajeros sentados (baja carga)<br>Peso del tren con pasajeros y de pie (media carga)<br>Peso de tren con pasajeros de pie (completo) |
| Capacidad del tren | 1800 pasajeros   | Siendo 324 sentados y 1476 de pie (AW2)  |

*Tabla 1: Parámetros Básicos del Tren*

NOTA: **AW2** será el peso del tren a utilizar en la simulación

### 4.2.2 Parámetros operacionales

En los datos adjuntos a continuación, se definen los parámetros dinámicos del tren a utilizar:

| Característica                          | Valores                 | Descripción  |
|---|-------------------------|--|
| Límite de Velocidad                     | 85 km/h                 | Limitado por el trazado de la vía  |
| Freno de Servicio                       | 1,1 m / s <sup>2</sup>  | Define el valor de freno por defecto a utilizar  |
| Freno de Emergencia                     | 1,3 m / s <sup>2</sup>  | Define el valor de freno en condiciones de emergencia                                  |
| Freno de Emergencia Garantizado         | 0,78 m / s <sup>2</sup> | Define el valor de freno de emergencia garantizado al aplicarse el freno de emergencia |
| Tiempo de Respuesta Freno de Servicio   | 2,0 s                   | Define el tiempo antes de la actuación del freno de servicio                           |
| Tiempo de Respuesta Freno de Emergencia | 1,6 s                   | Define el tiempo antes de la actuación del freno de emergencia                         |
| Tasa de Aceleración media               | 1,2 m / s <sup>2</sup>  | Define la tasa de aceleración media a aplicar  |

*Tabla 2: Parámetros Operacionales del Tren*



#### 4.2.3 Esfuerzo de tracción

El esfuerzo de tracción es el resultante de la fuerza producida por el tren en el sentido de la marcha y que resulta necesaria para el avance. Este esfuerzo es transmitido a las ruedas del tren al apoyarse éstas sobre el carril y transmitir el par producido.

La curva de tracción, en función de la velocidad, es diferente para cada tren por lo que ésta ha sido obtenida a partir de los datos suministrados por el fabricante y será introducida en el programa de simulación:

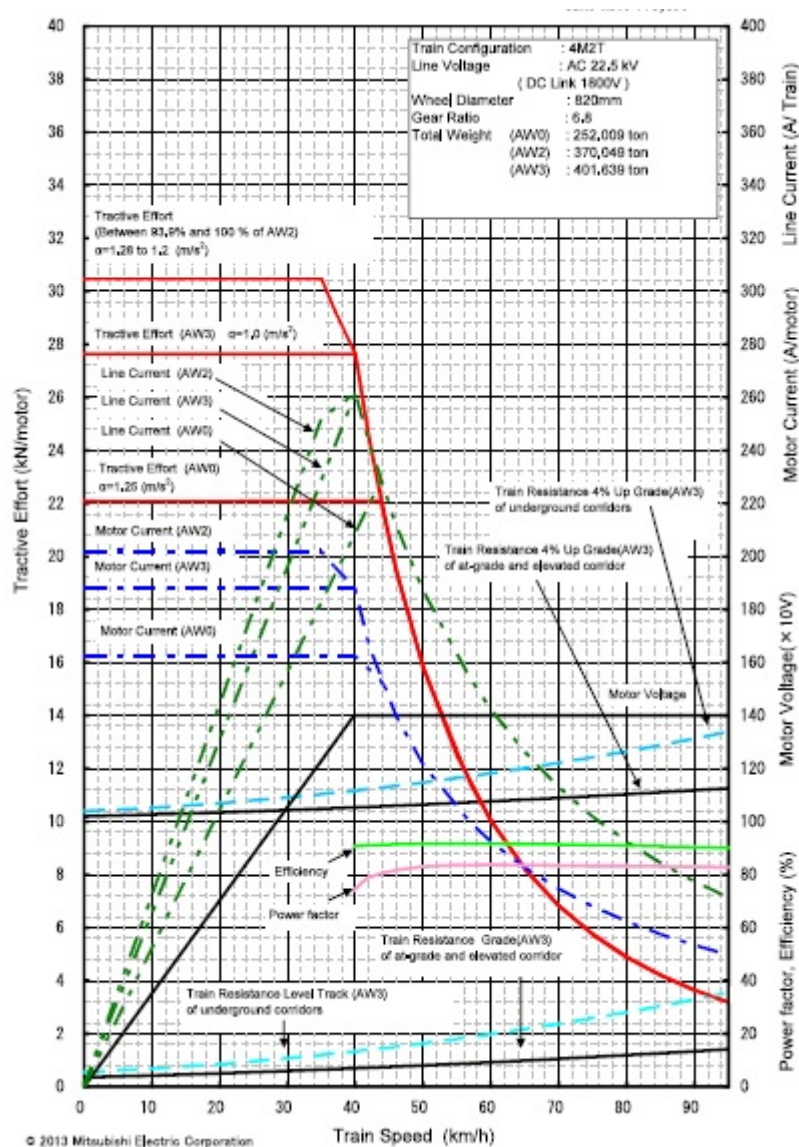


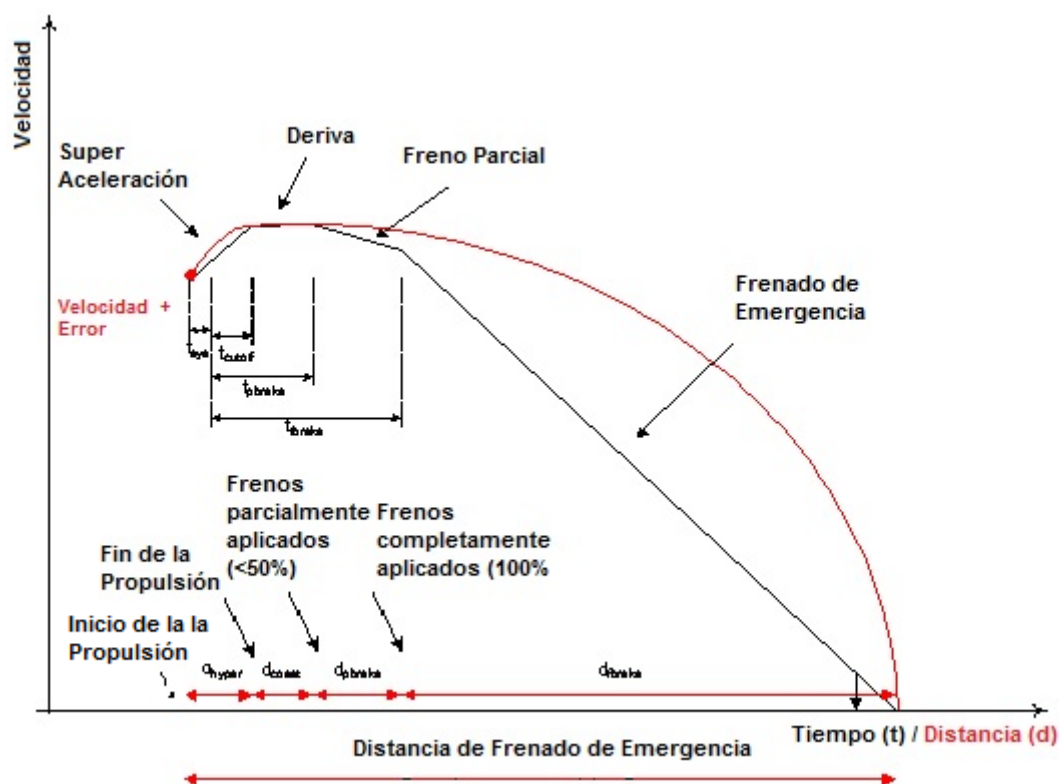
Ilustración 69: Esfuerzo de Tracción

#### 4.2.4 Esfuerzo de frenado

El esfuerzo de frenado es el resultante de las fuerzas que se realizan desde los diferentes frenos del tren (freno de servicio y de emergencia) y que se oponen al avance.

La curva de frenado calculada por el Sistema de Señalización Embarcado es obtenida en base a la velocidad del tren y calculada en base a la distancia necesaria para detener el tren en las peores condiciones posibles (Distancia de Frenado de Emergencia).

Para ello, se consideran cuatro intervalos de distancias que dan lugar a una curva de frenado expuesta a continuación y que será introducida en el programa de simulación



*Ilustración 70: Curva de Frenado de Emergencia*

#### 4.2.5 Resistencia Aerodinámica

La resistencia a la circulación del tren es la resultante de las fuerzas que se oponen al movimiento del tren en la dirección de la vía, diferentes a los esfuerzos de tracción y de frenado.

Entre ellas, se encuentra fuerzas tales como: el rozamiento entre las ruedas y los carriles, rozamientos internos de las partes móviles y giratorias, rozamientos de las pestañas en las curvas, la fuerza necesaria para refrigerar el aire que entra en el tren y la resistencia aerodinámica.

Para la modelización de la resistencia aerodinámica, se utilizará la ecuación de Davis expresada como:



$$R_{ae} = A + BxV + CxV^2$$

donde:  $R_{ae}$  es la resistencia aerodinámica,  $V$  es la velocidad del tren y  $A$ ,  $B$  y  $C$  son coeficientes que dependen de las características del tren y para los que se ha utilizado los siguientes valores:

$A$  (coeficiente relativo a sección, longitud y forma del tren)= 24,75 Kg/m

$B$  (coeficiente relativo a efectos de la transmisión, suspensión y carril) = 950, 4 Kg/s

$C$  (coeficiente relativo a la resistencia a la rodadura del tren)= 14,01 N

## 4.3 Características de la Solución de Señalización

### 4.3.1 Solución de Señalización de Cantón Fijo

Para la modelización de la Solución de Señalización de Cantón Fijo se tendrá en cuenta la siguiente característica:

- Sólo podrá existir un tren en cada cantón. Mientras que un tren circula por un determinado cantón, éste podrá progresar de acuerdo al perfil de velocidad calculado por el Sistema de Señalización Embarcado, que será función de la restricción civil de velocidad, el radio de curvatura y el gradiente. Tan pronto como el tren precedente abandone el cantón, el tren siguiente podrá circularlo.

### 4.3.2 Solución de Señalización de Cantón Móvil

Para la modelización de la Solución de Señalización de Cantón Móvil se tendrá en cuenta la siguiente característica:

- Mientras que las ocupaciones virtuales de los trenes en la simulación no confluyan, éstos podrán progresar de acuerdo al perfil de velocidad calculado por el Sistema de Señalización Embarcado, que será función de la restricción civil de velocidad, el radio de curvatura y el gradiente.





## 5 CAPÍTULO 5: CÁLCULO DE PARÁMETROS DEL SISTEMA DE SEÑALIZACIÓN

En el siguiente capítulo se realizará el cálculo de los parámetros que permitirán comparar los dos Sistemas de Señalización y que han sido modelizados en el capítulo anterior.

En el primer capítulo y en base a los datos de fiabilidad y mantenibilidad de cada uno de los componentes definidos, se realizará el cálculo de la disponibilidad. Para ello, previamente se definirán los distintos módulos funcionales que componen los Sistemas de Señalización detallados en el capítulo anterior, así como el listado de materiales que componen cada uno de estos módulos.

En el segundo capítulo, se definirán el resto de componentes no funcionales que permitirán realizar el cálculo del coste de ambos Sistemas de Señalización.

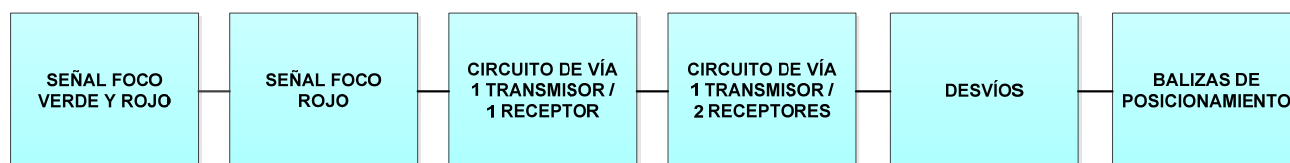
En el último capítulo, se desarrollarán los cálculos relativos a la capacidad de ambos Sistemas de Señalización utilizando para ello un programa de simulación en el que serán introducidos todos los datos de modelización definidos en el capítulo anterior.

### 5.1 Cálculos de los Parámetros de Fiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad

#### 5.1.1 Sistema de Señalización de Cantón Fijo

##### 5.1.1.1 Módulo Funcional Equipamiento de Vía

El Equipamiento de Vía es representado a partir del módulo funcional que se representa a continuación, compuesto por los circuitos de vía (de un transmisor y un receptor y de un transmisor y dos receptores), las señales de focos verde y rojo y señales de foco rojo, los desvíos y las balizas de posicionamiento.



*Ilustración 71: Módulo Funcional Equipamiento de Vía Cantón Fijo*

##### 5.1.1.1.1 Listado de Material Equipamiento de Vía

De acuerdo al trazado de vía identificado para la solución de señalización de cantón fijo, el listado de material para la unidad funcional de Equipamiento de Vía está compuesto por:

| Elemento de Unidad Funcional  | Unidad |
|-------------------------------|--------|
| Señal Foco Verde y Rojo (LED) | 95     |



| Elemento de Unidad Funcional                | Unidad |
|---|--------|
| Señal Foco Rojo (LED)                       | 10     |
| Circuito de Vía 1 Transmisor / 1 Receptor   | 254    |
| Circuito de Vía 1 Transmisor / 2 Receptores | 29     |
| Desvíos                                     | 34     |
| Balizas de Posicionamiento                  | 112    |

Tabla 3: Listado de Material Equipamiento de Vía Cantón Fijo

#### 5.1.1.1.2 Fiabilidad Equipamiento de Vía

A continuación se presentan los distintos valores de fiabilidad expresados a través de los parámetros MTTF y Tasa de Fallo de cada uno de los componentes que componen el módulo funcional siendo:

$$\text{Tasa de Fallo} = \frac{\text{Unidades} \times \text{Horas} / \text{año}}{\text{MTTF}}$$

| Elemento de Unidad Funcional                | MTTF    | Tasa de Fallo (f/año) |
|---|---------|-----------------------|
| Señal Foco Verde y Rojo                     | 1200000 | 0,6935                |
| Señal Foco Rojo                             | 1200000 | 0,073                 |
| Circuito de Vía 1 Transmisor / 1 Receptor   | 350000  | 6,3573                |
| Circuito de Vía 1 Transmisor / 2 Receptores | 350000  | 0,7258                |
| Desvíos                                     | 300000  | 0,9928                |
| Balizas de Posicionamiento                  | 5700000 | 0,1721                |

Tabla 4: Fiabilidad Equipamiento de Vía Cantón Fijo

#### 5.1.1.1.3 Mantenibilidad Equipamiento de Vía

A continuación se presentan los distintos valores de fiabilidad expresados a través del parámetro MTTR de cada uno de los componentes que componen el módulo funcional:

| Elemento de Unidad Funcional              | MTTR (h) |
|---|----------|
| Señal Foco Verde y Rojo                   | 0,5      |
| Señal Foco Rojo                           | 0,5      |
| Circuito de Vía 1 Transmisor / 1 Receptor | 1,5      |



| Elemento de Unidad Funcional                | MTTR (h) |
|---|----------|
| Circuito de Vía 1 Transmisor / 2 Receptores | 1,5      |
| Desvíos                                     | 2        |
| Balizas de Posicionamiento                  | 1        |

*Tabla 5: Mantenibilidad Equipamiento de Vía Cantón Fijo*

#### 5.1.1.1.4 Disponibilidad Equipamiento de Vía

A continuación se realiza el cálculo de disponibilidad del componente, así como del sistema completo siendo:

$$\text{Disponibilidad de la Unidad} = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR}$$

$$\text{Disponibilidad del Sistema} = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad \text{UNIDADES}$$

$$\text{Disponibilidad del Módulo Funcional} = DS \times DC \times DD \times DB$$

| Elemento de Unidad Funcional                | Unidades | Disponibilidad Unidad | Disponibilidad Sistema |
|---|----------|-----------------------|------------------------|
| Señal Foco Verde y Rojo                     | 95       | 0,999999583           | 0,999960417            |
| Señal Foco Rojo                             | 10       | 0,999999583           | 0,999995833            |
| <b>Disponibilidad Señales (DS)</b>          |          |                       | <b>0,999956251</b>     |
| <b>DS (%)</b>                               |          |                       | <b>99,9956251</b>      |
| Circuito de Vía 1 Transmisor / 1 Receptor   | 254      | 0,999995714           | 0,998912023            |
| Circuito de Vía 1 Transmisor / 2 Receptores | 29       | 0,999995714           | 0,999875722            |
| <b>Disponibilidad Circuitos(DC)</b>         |          |                       | <b>0,998787881</b>     |
| <b>DC (%)</b>                               |          |                       | <b>99,87878807</b>     |
| Desvíos                                     | 34       | 0,999993333           | 0,99977336             |
| <b>Disponibilidad Desvíos(DD)</b>           |          | 0,999993333           | <b>0,99977336</b>      |
| <b>DD (%)</b>                               |          |                       | <b>99,977336</b>       |
| Balizas de Posicionamiento                  | 112      | 0,999999825           | 0,999980351            |
| <b>Disponibilidad Balizas (DB)</b>          |          | 0,999999825           | <b>0,999980351</b>     |



| Elemento de Unidad Funcional                                   | Unidades | Disponibilidad Unidad | Disponibilidad Sistema |
|--|----------|-----------------------|------------------------|
| <b>DB (%)</b>  |          |                       | <b>99,9980351</b>      |
| <b>Disponibilidad Modulo Funcional Equipamiento de Vía</b>     |          |                       | <b>0,998498209</b>     |
| <b>Disponibilidad Modulo Funcional Equipamiento de Vía (%)</b> |          |                       | <b>99,84982093</b>     |

*Tabla 6: Disponibilidad Equipamiento de Vía Cantón Fijo*

#### 5.1.1.2 Módulo Funcional Sistema Controlador de Equipamiento de Vía

El Sistema Controlador de Equipamiento de Vía es representado a partir del módulo funcional que se representa a continuación, compuesto por el Subrack de Controlador, su correspondiente fuente de alimentación, dos tarjetas de comunicación con funcionamiento, una tarjeta de distribución de energía y las correspondientes tarjetas para el control del equipamiento de vía, compuesto por las tarjetas controladoras de circuitos de vía, de señales y de desvíos.

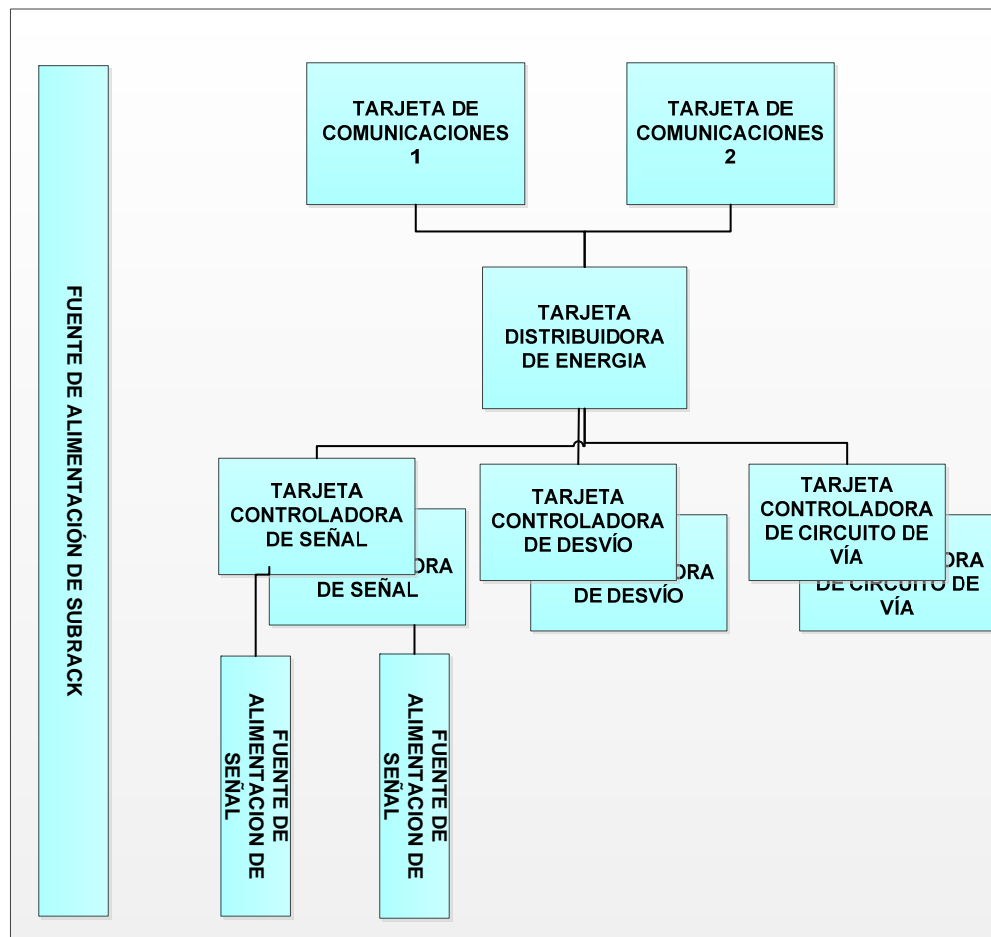


Ilustración 72: Módulo Funcional Sistema Controlador de Equipamiento de Vía Cantón Fijo

#### 5.1.1.2.1 Listado de Material Sistema Controlador de Equipamiento de Vía

De acuerdo al trazado de vía identificado para la solución de señalización de cantón fijo, el listado de material para la unidad funcional del Sistema Controlador del Equipamiento de Vía está compuesto por:

| Elemento de Unidad Funcional                       | Unidad |
|--|--------|
| Fuente de Alimentación del Subrack                 | 17     |
| Tarjeta de Comunicaciones                          | 56     |
| Tarjeta Distribuidora de Energía                   | 33     |
| Tarjeta Controladora de Circuito de Vía Codificado | 112    |
| Tarjeta Controladora de Señal                      | 52     |



| Elemento de Unidad Funcional      | Unidad |
|-----------------------------------|--------|
| Tarjeta Controladora de Desvío    | 34     |
| Fuente de Alimentación de Señales | 24     |

*Tabla 7: Listado de Material Sistema Controlador de Equipamiento de Vía Cantón Fijo*

#### 5.1.1.2.2 Fiabilidad Sistema Controlador de Equipamiento de Vía

A continuación se presentan los distintos valores de fiabilidad expresados a través de los parámetros MTTF y Tasa de Fallo de cada uno de los componentes que componen el módulo funcional siendo:

$$\text{Tasa de Fallo} = \frac{\text{Unidades} \times \text{Horas} / \text{año}}{\text{MTTF}}$$

| Elemento de Unidad Funcional                       | MTTF    | Tasa de Fallo (f/año) |
|--|---------|-----------------------|
| Fuente de Alimentación del Subrack                 | 3600000 | 0,0414                |
| Tarjeta de Comunicaciones                          | 789000  | 0,6217                |
| Tarjeta Distribuidora de Energía                   | 1169500 | 0,2472                |
| Tarjeta Controladora de Circuito de Vía Codificado | 2062500 | 0,4757                |
| Tarjeta Controladora de Señal                      | 375000  | 1,2147                |
| Tarjeta Controladora de Desvío                     | 353570  | 0,8424                |
| Fuente de Alimentación de Señales                  | 3600000 | 0,0584                |

*Tabla 8: Fiabilidad Sistema Controlador de Equipamiento de Vía Cantón Fijo*

#### 5.1.1.2.3 Mantenibilidad Sistema Controlador de Equipamiento de Vía

A continuación se presentan los distintos valores de fiabilidad expresados a través del parámetro MTTR de cada uno de los componentes que componen el módulo funcional:

| Elemento de Unidad Funcional                       | MTTR (h) |
|--|----------|
| Fuente de Alimentación del Subrack                 | 0,5      |
| Tarjeta de Comunicaciones                          | 0,5      |
| Tarjeta Distribuidora de Energía                   | 0,5      |
| Tarjeta Controladora de Circuito de Vía Codificado | 0,5      |



| Elemento de Unidad Funcional      | MTTR (h) |
|-----------------------------------|----------|
| Tarjeta Controladora de Señal     | 0,5      |
| Tarjeta Controladora de Desvío    | 0,5      |
| Fuente de Alimentación de Señales | 0,5      |

Tabla 9: Mantenibilidad Sistema Controlador de Equipamiento de Vía Cantón Fijo

#### 5.1.1.2.4 Disponibilidad Sistema Controlador de Equipamiento de Vía

A continuación se realiza el cálculo de disponibilidad del componente, así como del sistema completo siendo:

$$\text{Disponibilidad de la Unidad} = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR}$$

$$\text{Disponibilidad del Sistema} = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \text{ UNIDADES}$$

$$\text{Disponibilidad del Módulo Funcional} = \text{FAR} \times \text{TC} \times \text{TDE} \times \text{TCC} \times \text{TCS} \times \text{TCD} \times \text{FAS}$$

| Elemento de Unidad Funcional  | Unidades | Disponibilidad Unidad | Disponibilidad Sistema |
|---|----------|-----------------------|------------------------|
| Fuente de Alimentación del Subrack (FAR)  | 17       | 0,999999861           | 0,999997639            |
| Tarjeta de Comunicaciones (TC)  | 56       | 0,999999366           | 0,999964513            |
| Tarjeta Distribuidora de Energía (TDE)  | 33       | 0,999999572           | 0,999985892            |
| Tarjeta Controladora de Circuito de Vía Codificado (TCC)                              | 112      | 0,999999758           | 0,999972849            |
| Tarjeta Controladora de Señal (TCS)   | 52       | 0,999998667           | 0,999930669            |
| Tarjeta Controladora de Desvío (TCD)  | 34       | 0,999998586           | 0,99995192             |
| Fuente de Alimentación de Señales (FAS)   | 24       | 0,999999861           | 0,999996667            |
| <b>Disponibilidad Modulo Funcional Sistema Controlador de Equipamiento de Vía</b>     |          |                       | <b>0,999800163</b>     |
| <b>Disponibilidad Modulo Funcional Sistema Controlador de Equipamiento de Vía (%)</b> |          |                       | <b>99,9800163</b>      |

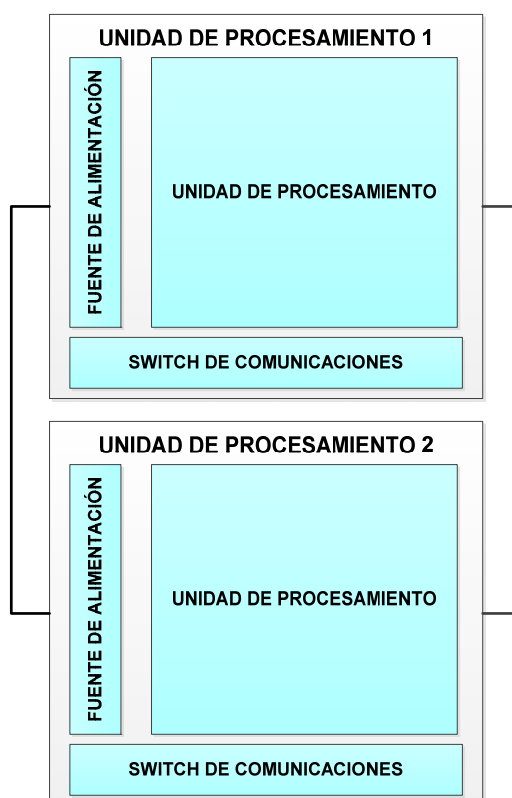
Tabla 10: Disponibilidad Sistema Controlador de Equipamiento de Vía Cantón Fijo





### 5.1.1.3 Módulo Funcional Unidad Central de Procesamiento

La Unidad Central de Procesamiento es representada a partir del módulo funcional que se representa a continuación, compuesto por una fuente de alimentación, la unidad central de procesamiento (compuesta por los procesadores redundantes de cálculo) y un switch de comunicaciones. Cada una de las Unidades Centrales de Procesamiento se compone de dos unidades con funcionamiento redundante.



*Ilustración 73: Módulo Funcional Unidad Central de Procesamiento*

#### 5.1.1.3.1 Listado de Material Unidad Central de Procesamiento

De acuerdo a la distribución de las Unidades Centrales de Procesamiento para el trazado definido (dos unidades redundantes), el listado de material para la unidad funcional de la Unidad Central de Procesamiento está compuesto por:

| Elemento de Unidad Funcional | Unidad |
|------------------------------|--------|
| Unidad de Procesamiento      | 4      |
| Fuente de Alimentación       | 4      |
| Switch de Comunicaciones     | 4      |

*Tabla 11: Listado de Material Unidad Central de Procesamiento Cantón Fijo*



#### 5.1.1.3.2 Fiabilidad Unidad Central de Procesamiento

A continuación se presentan los distintos valores de fiabilidad expresados a través de los parámetros MTTF y Tasa de Fallo de cada uno de los componentes que componen el módulo funcional siendo:

$$\text{Tasa de Fallo} = \frac{\text{Unidades} \times \text{Horas} / \text{año}}{\text{MTTF}}$$

| Elemento de Unidad Funcional | MTTF   | Tasa de Fallo (f/año) |
|------------------------------|--------|-----------------------|
| Unidad de Procesamiento      | 994880 | 0,3522                |
| Fuente de Alimentación       | 81200  | 0,4315                |
| Switch de Comunicaciones     | 283000 | 0,1238                |

Tabla 12: Fiabilidad Unidad Central de Procesamiento Cantón Fijo

#### 5.1.1.3.3 Mantenibilidad Unidad Central de Procesamiento

A continuación se presentan los distintos valores de mantenibilidad expresados a través del parámetro MTTR de cada uno de los componentes que componen el módulo funcional:

| Elemento de Unidad Funcional | MTTR (h) |
|------------------------------|----------|
| Unidad de Procesamiento      | 0,5      |
| Fuente de Alimentación       | 0,5      |
| Switch de Comunicaciones     | 0,5      |

Tabla 13: Mantenibilidad Unidad Central de Procesamiento Cantón Fijo

#### 5.1.1.3.4 Disponibilidad Unidad Central de Procesamiento

A continuación se realiza el cálculo de disponibilidad del componente, así como del sistema completo:

$$\text{Disponibilidad de la Unidad} = \frac{\text{MTTF}}{\text{MTTF} + \text{MTTR}}$$

$$\text{Disponibilidad del Sistema} = \frac{\text{MTTF}^{\text{UNIDADES}}}{\text{MTTF} + \text{MTTR}}$$

$$\text{Disponibilidad del Módulo Funcional} = \text{UP} \times \text{FA} \times \text{SC}$$



| Elemento de Unidad Funcional                              | Unidades | Disponibilidad Unidad | Disponibilidad Sistema |
|---|----------|-----------------------|------------------------|
| Unidad de Procesamiento (UP)                              | 4        | 0,999999497           | 0,99999999             |
| Fuente de Alimentación (FA)                               | 4        | 0,999993842           | 0,99997537             |
| Switch de Comunicaciones (SC)                             | 4        | 0,999998233           | 0,999992933            |
| <b>Disponibilidad Modulo Funcional Sistema de Vía</b>     |          |                       | <b>0,999968303</b>     |
| <b>Disponibilidad Modulo Funcional Sistema de Vía (%)</b> |          |                       | <b>99,99683029</b>     |

Tabla 14: Disponibilidad Unidad Central de Procesamiento Cantón Fijo

#### 5.1.1.4 Módulo Funcional Sistema de Señalización Embarcado en Material Móvil

El Sistema de Señalización Embarcado en Material Móvil es representado a partir del módulo funcional que se representa a continuación, compuesto por una fuente de alimentación, la unidad central de procesamiento (compuesta por los procesadores redundantes de cálculo) y un switch de comunicaciones. Cada una de las Unidades Centrales de Proceso se compone de dos unidades con funcionamiento redundante.

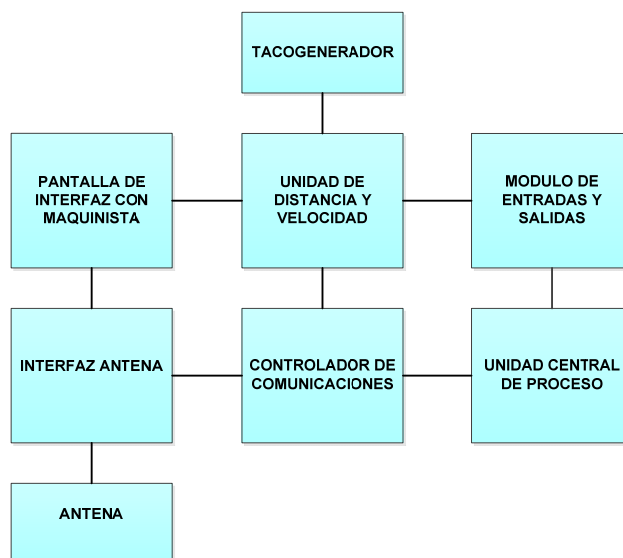


Ilustración 74: Módulo Funcional Sistema de Señalización Embarcado en Material Móvil

##### 5.1.1.4.1 Listado de Material Sistema de Señalización Embarcado en Material Móvil

Asumiendo que el número de trenes en la línea será igual a 17 trenes, y cada tren cuenta doble cabina, el listado de material para la unidad funcional del Sistema de Señalización Embarcado en Material Móvil está compuesto por:



| Elemento de Unidad Funcional        | Unidad | Total |
|-------------------------------------|--------|-------|
| Unidad Central de Proceso           | 4      | 68    |
| Unidad de Distancia y Velocidad     | 2      | 34    |
| Tacogenerador                       | 4      | 68    |
| Módulo de Entradas y Salidas        | 2      | 34    |
| Controlador de Comunicaciones       | 2      | 34    |
| Pantalla de Interfaz con Maquinista | 2      | 34    |
| Interfaz Antena                     | 2      | 34    |
| Antena                              | 2      | 34    |

Tabla 15: Listado de Material Sistema Señalización Embarcado Material Móvil Cantón Fijo

#### 5.1.1.4.2 Fiabilidad Sistema de Señalización Embarcado en Material Móvil

A continuación se presentan los distintos valores de fiabilidad expresados a través de los parámetros MTTF y Tasa de Fallo de cada uno de los componentes que componen el módulo funcional siendo:

$$\text{Tasa de Fallo} = \frac{\text{Unidades} \times \text{Horas} / \text{año}}{\text{MTTF}}$$

| Elemento de Unidad Funcional        | MTTF    | Tasa de Fallo (f/año) |
|-------------------------------------|---------|-----------------------|
| Unidad Central de Proceso           | 800000  | 0,7446                |
| Unidad de Distancia y Velocidad     | 1600000 | 0,1861                |
| Tacogenerador                       | 1226250 | 0,4856                |
| Módulo de Entradas y Salidas        | 1000000 | 0,2978                |
| Controlador de Comunicaciones       | 1000000 | 0,2978                |
| Pantalla de Interfaz con Maquinista | 200000  | 1,4892                |
| Interfaz Antena                     | 184000  | 1,6187                |
| Antena                              | 1100000 | 0,2707                |

Tabla 16: Fiabilidad Sistema de Señalización Embarcado en Material Móvil Cantón Fijo



#### 5.1.1.4.3 Mantenibilidad Sistema de Señalización Embarcado en Material Móvil

A continuación se presentan los distintos valores de fiabilidad expresados a través del parámetro MTTR de cada uno de los componentes que componen el módulo funcional:

| Elemento de Unidad Funcional        | MTTR(h) |
|-------------------------------------|---------|
| Unidad Central de Proceso           | 2       |
| Unidad de Distancia y Velocidad     | 1       |
| Tacogenerador                       | 0,5     |
| Módulo de Entradas y Salidas        | 1       |
| Controlador de Comunicaciones       | 2       |
| Pantalla de Interfaz con Maquinista | 3       |
| Interfaz Antena                     | 1       |
| Antena                              | 1,5     |

Tabla 17: Mantenibilidad Sistema de Señalización Embarcado en Material Móvil Cantón Fijo

#### 5.1.1.4.4 Disponibilidad Sistema de Señalización Embarcado en Material Móvil

A continuación se realiza el cálculo de disponibilidad del componente, así como del sistema completo:

$$\text{Disponibilidad de la Unidad} = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR}$$

$$\text{Disponibilidad del Sistema} = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad \text{UNIDADES}$$

$$\text{Disponibilidad del Módulo Funcional} = UP \times UDV \times TG \times MES \times CC \times PIM \times IA \times A$$

| Elemento de Unidad Funcional              | Unidades | Disponibilidad Unidad | Disponibilidad Sistema |
|---|----------|-----------------------|------------------------|
| Unidad Central de Proceso (UP)            | 68       | 0,9999975             | 0,999830015            |
| Unidad de Distancia y Velocidad (UDV)     | 34       | 0,999999375           | 0,99997875             |
| Tacogenerador (TG)                        | 68       | 0,999999592           | 0,999972274            |
| Módulo de Entradas y Salidas (MES)        | 34       | 0,999999              | 0,999966001            |
| Controlador de Comunicaciones (CC)        | 34       | 0,999998              | 0,999932002            |
| Pantalla de Interfaz con Maquinista (PIM) | 34       | 0,999985              | 0,999490134            |



| Elemento de Unidad Funcional   | Unidades | Disponibilidad Unidad | Disponibilidad Sistema |
|--|----------|-----------------------|------------------------|
| Interfaz Antena (IA)   | 34       | 0,999994565           | 0,999815235            |
| Antena (A)   | 34       | 0,999998636           | 0,999953637            |
| <b>Disponibilidad Modulo Funcional Sistema de Señalización Embarcado en Material Móvil</b>     |          |                       | <b>0,998938445</b>     |
| <b>Disponibilidad Modulo Funcional Sistema de Señalización Embarcado en Material Móvil (%)</b> |          |                       | <b>99,89384455</b>     |

Tabla 18: Disponibilidad Sistema de Señalización Embarcado en Material Móvil Cantón Fijo

## 5.1.2 Sistema de Señalización de Cantón Móvil

### 5.1.2.1 Módulo Funcional Equipamiento de Vía

El Equipamiento de Vía es representado a partir del módulo funcional que se representa a continuación, compuesto exclusivamente por las antenas de radio y desvíos.



Ilustración 75: Módulo Funcional Equipamiento de Vía Cantón Móvil

#### 5.1.2.1.1 Listado de Material Equipamiento de Vía

De acuerdo al trazado de vía identificado para la solución de señalización de cantón fijo, móvil el listado de material para la unidad funcional de Equipamiento de Vía está compuesto por:

| Elemento de Unidad Funcional | Unidad |
|------------------------------|--------|
| Antenas de Radio             | 112    |
| Desvíos                      | 34     |
| Balizas de Posicionamiento   | 222    |

Tabla 19: Listado de Material Equipamiento de Vía Cantón Móvil



#### 5.1.2.1.2 Fiabilidad Equipamiento de Vía

A continuación se presentan los distintos valores de fiabilidad expresados a través de los parámetros MTTF y Tasa de Fallo de cada uno de los componentes que componen el módulo funcional siendo:

$$\text{Tasa de Fallo} = \frac{\text{Unidades} \times \text{Horas} / \text{año}}{\text{MTTF}}$$

| Elemento de Unidad Funcional | MTTF    | Tasa de Fallo (f/año) |
|------------------------------|---------|-----------------------|
| Antenas de Radio             | 7621200 | 0,1287                |
| Desvíos                      | 300000  | 0,9928                |
| Balizas de Posicionamiento   | 5700000 | 0,3412                |

Tabla 20: Fiabilidad Equipamiento de Vía Cantón Móvil

#### 5.1.2.1.3 Mantenibilidad Equipamiento de Vía

A continuación se presentan los distintos valores de fiabilidad expresados a través del parámetro MTTR de cada uno de los componentes que componen el módulo funcional:

| Elemento de Unidad Funcional | MTTR (h) |
|------------------------------|----------|
| Antenas de Radio             | 1        |
| Desvíos                      | 2        |
| Balizas de Posicionamiento   | 1        |

Tabla 21: Mantenibilidad Equipamiento de Vía Cantón Móvil

#### 5.1.2.1.4 Disponibilidad Equipamiento de Vía

A continuación se realiza el cálculo de disponibilidad del componente, así como del sistema completo siendo:

$$\text{Disponibilidad de la Unidad} = \frac{\text{MTTF}}{\text{MTTF} + \text{MTTR}}$$

$$\text{Disponibilidad del Sistema} = \frac{\text{MTTF}^{\text{UNIDADES}}}{\text{MTTF} + \text{MTTR}}$$

$$\text{Disponibilidad del Módulo Funcional} = \text{DAR} \times \text{DD} \times \text{DB}$$





| Elemento de Unidad Funcional                                   | Unidades | Disponibilidad Unidad | Disponibilidad Sistema |
|--|----------|-----------------------|------------------------|
| Antenas de Radio   | 112      | 0,999999869           | 0,999985304            |
| <b>Disponibilidad Antenas Radio (DAR)</b>                      |          | 0,999999869           | <b>0,999985304</b>     |
| <b>DAR (%)</b>   |          |                       | <b>99,9985304</b>      |
| Desvíos  | 34       | 0,999993333           | 0,99977336             |
| <b>Disponibilidad Desvíos (DD)</b>                             |          | 0,999993333           | <b>0,99977336</b>      |
| <b>DD (%)</b>  |          |                       | <b>99,977336</b>       |
| Balizas de Posicionamiento                                     | 222      | 0,999999825           | 0,999961053            |
| <b>Disponibilidad Balizas (DB)</b>                             |          | 0,999999825           | <b>0,999961053</b>     |
| <b>DB (%)</b>  |          |                       | <b>99,9961053</b>      |
| <b>Disponibilidad Modulo Funcional Equipamiento de Vía</b>     |          |                       | <b>0,99971973</b>      |
| <b>Disponibilidad Modulo Funcional Equipamiento de Vía (%)</b> |          |                       | <b>99,97197302</b>     |

*Tabla 22: Disponibilidad Equipamiento de Vía Cantón Móvil*

#### 5.1.2.2 Módulo Funcional Sistema Controlador de Equipamiento de Vía

El Sistema Controlador de Equipamiento de Vía es representado a partir del módulo funcional que se representa a continuación, compuesto por el Subrack de Controlador, su correspondiente fuente de alimentación, dos tarjetas de comunicación con funcionamiento redundante, una tarjeta de distribución de energía y las correspondientes tarjetas para el control del equipamiento de vía, compuesto por las tarjetas controladoras de desvíos.

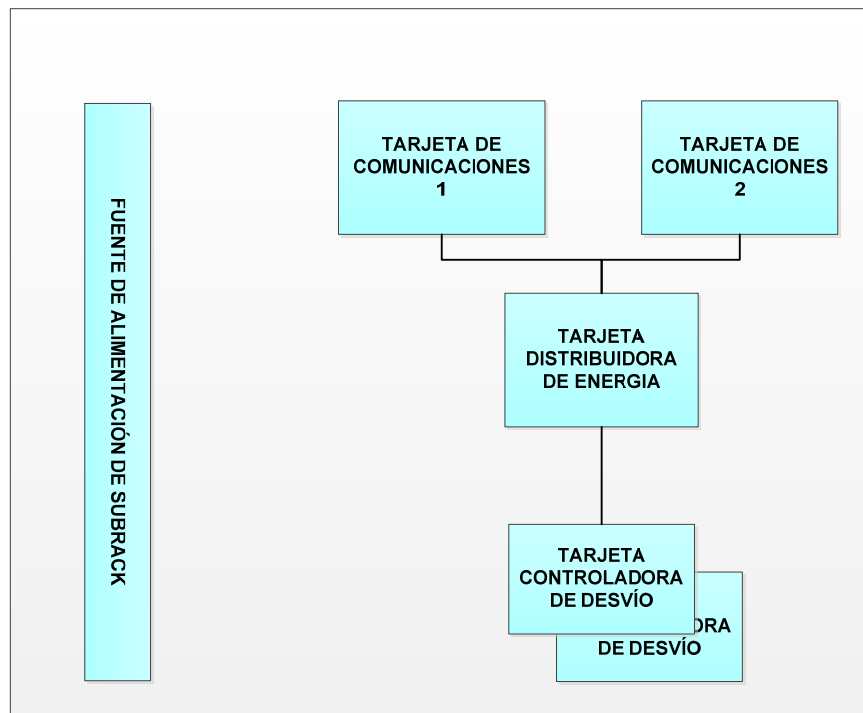


Ilustración 76: Módulo Funcional Sistema Controlador de Equipamiento de Vía Cantón Móvil

#### 5.1.2.2.1 Listado de Material Sistema Controlador de Equipamiento de Vía

De acuerdo al trazado de vía identificado para la solución de señalización de cantón fijo, el listado de material para la unidad funcional del Sistema Controlador del Equipamiento de Vía está compuesto por:

| Elemento de Unidad Funcional       | Unidad |
|------------------------------------|--------|
| Fuente de Alimentación del Subrack | 5      |
| Tarjeta de Comunicaciones          | 10     |
| Tarjeta Distribuidora de Energía   | 9      |
| Tarjeta Controladora de Desvío     | 34     |

Tabla 23: Listado de Material Sistema Controlador de Equipamiento de Vía Cantón Móvil

#### 5.1.2.2.2 Fiabilidad Sistema Controlador de Equipamiento de Vía

A continuación se presentan los distintos valores de fiabilidad expresados a través de los parámetros MTTF y Tasa de Fallo de cada uno de los componentes que componen el módulo funcional siendo:



$$\text{Tasa de Fallo} = \frac{\text{Unidades} \times \text{Horas} / \text{año}}{MTTF}$$

| Elemento de Unidad Funcional       | MTTF    | Tasa de Fallo (f/año) |
|------------------------------------|---------|-----------------------|
| Fuente de Alimentación del Subrack | 3600000 | 0,0122                |
| Tarjeta de Comunicaciones          | 789000  | 0,1110                |
| Tarjeta Distribuidora de Energía   | 1169500 | 0,0674                |
| Tarjeta Controladora de Desvío     | 353570  | 0,8424                |

Tabla 24: Fiabilidad Sistema Controlador de Equipamiento de Vía Cantón Móvil

#### 5.1.2.2.3 Mantenibilidad Sistema Controlador de Equipamiento de Vía

A continuación se presentan los distintos valores de fiabilidad expresados a través del parámetro MTTR de cada uno de los componentes que componen el módulo funcional:

| Elemento de Unidad Funcional       | MTTR (h) |
|------------------------------------|----------|
| Fuente de Alimentación del Subrack | 0,5      |
| Tarjeta de Comunicaciones          | 0,5      |
| Tarjeta Distribuidora de Energía   | 0,5      |
| Tarjeta Controladora de Desvío     | 0,5      |

Tabla 25: Mantenibilidad Sistema Controlador de Equipamiento de Vía Cantón Móvil

#### 5.1.2.2.4 Disponibilidad Sistema Controlador de Equipamiento de Vía

A continuación se realiza el cálculo de disponibilidad del componente, así como del sistema completo siendo:

$$\text{Disponibilidad de la Unidad} = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR}$$

$$\text{Disponibilidad del Sistema} = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad \text{UNIDADES}$$

$$\text{Disponibilidad del Módulo Funcional} = \text{FAR} \times \text{TC} \times \text{TDE} \times \text{TCD}$$



| Elemento de Unidad Funcional  | Unidades | Disponibilidad Unidad | Disponibilidad Sistema |
|---|----------|-----------------------|------------------------|
| Fuente de Alimentación del Subrack (FAR)  | 5        | 0,999999861           | 0,999999306            |
| Tarjeta de Comunicaciones (TC)  | 10       | 0,999999366           | 0,999993663            |
| Tarjeta Distribuidora de Energía (TDE)  | 9        | 0,999999572           | 0,999996152            |
| Tarjeta Controladora de Desvío (TCD)  | 34       | 0,999998586           | 0,99995192             |
| <b>Disponibilidad Modulo Funcional Sistema Controlador de Equipamiento de Vía</b>     |          |                       | <b>0,999941041</b>     |
| <b>Disponibilidad Modulo Funcional Sistema Controlador de Equipamiento de Vía (%)</b> |          |                       | <b>99,9941041</b>      |

Tabla 26: Disponibilidad Sistema Controlador de Equipamiento de Vía Cantón Móvil

#### 5.1.2.3 Módulo Funcional Unidad Central de Procesamiento

La Unidad Central de Procesamiento es representada a partir del módulo funcional que se representa a continuación, compuesto por una fuente de alimentación, la unidad central de procesamiento (compuesta por los procesadores redundantes de cálculo) y un switch de comunicaciones. Cada una de las Unidades Centrales de Procesamiento se compone de dos unidades con funcionamiento redundante.

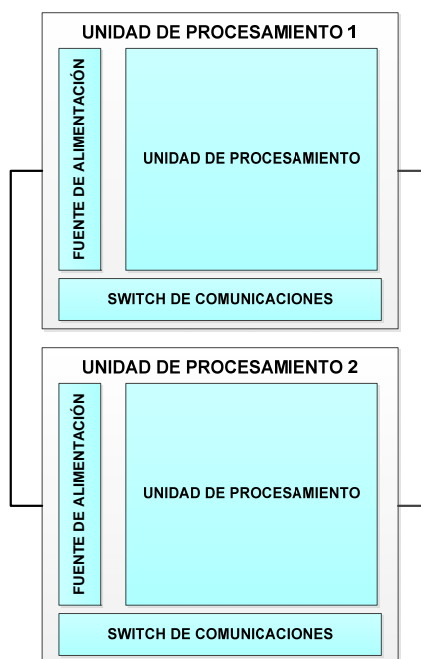


Ilustración 77: Módulo Funcional Unidad Central de Procesamiento



#### 5.1.2.3.1 Listado de Material Unidad Central de Procesamiento

De acuerdo a la distribución de las Unidades Centrales de Procesamiento para el trazado definido (dos unidades redundantes), el listado de material para la unidad funcional de la Unidad Central de Procesamiento está compuesto por:

| Elemento de Unidad Funcional | Unidad |
|------------------------------|--------|
| Unidad de Procesamiento      | 4      |
| Fuente de Alimentación       | 4      |
| Switch de Comunicaciones     | 4      |

*Tabla 27: Listado de Material Unidad Central de Procesamiento Cantón Móvil*

#### 5.1.2.3.2 Fiabilidad Unidad Central de Procesamiento

A continuación se presentan los distintos valores de fiabilidad expresados a través de los parámetros MTTF y Tasa de Fallo de cada uno de los componentes que componen el módulo funcional siendo:

$$\text{Tasa de Fallo} = \frac{\text{Unidades} \times \text{Horas} / \text{año}}{\text{MTTF}}$$

| Elemento de Unidad Funcional | MTTF   | Tasa de Fallo (f/año) |
|------------------------------|--------|-----------------------|
| Unidad de Procesamiento      | 994880 | 0,3522                |
| Fuente de Alimentación       | 81200  | 0,4315                |
| Switch de Comunicaciones     | 283000 | 0,1238                |

*Tabla 28: Fiabilidad Unidad Central de Procesamiento Cantón Móvil*

#### 5.1.2.3.3 Mantenibilidad Unidad Central de Procesamiento

A continuación se presentan los distintos valores de mantenibilidad expresados a través del parámetro MTTR de cada uno de los componentes que componen el módulo funcional:

| Elemento de Unidad Funcional | MTTR (h) |
|------------------------------|----------|
| Unidad de Procesamiento      | 0,5      |
| Fuente de Alimentación       | 0,5      |
| Switch de Comunicaciones     | 0,5      |

*Tabla 29: Mantenibilidad Unidad Central de Procesamiento Cantón Móvil*



#### 5.1.2.3.4 Disponibilidad Unidad Central de Procesamiento

A continuación se realiza el cálculo de disponibilidad del componente, así como del sistema completo siendo.

$$\text{Disponibilidad de la Unidad} = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR}$$

$$\text{Disponibilidad del Sistema} = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \text{ UNIDADES}$$

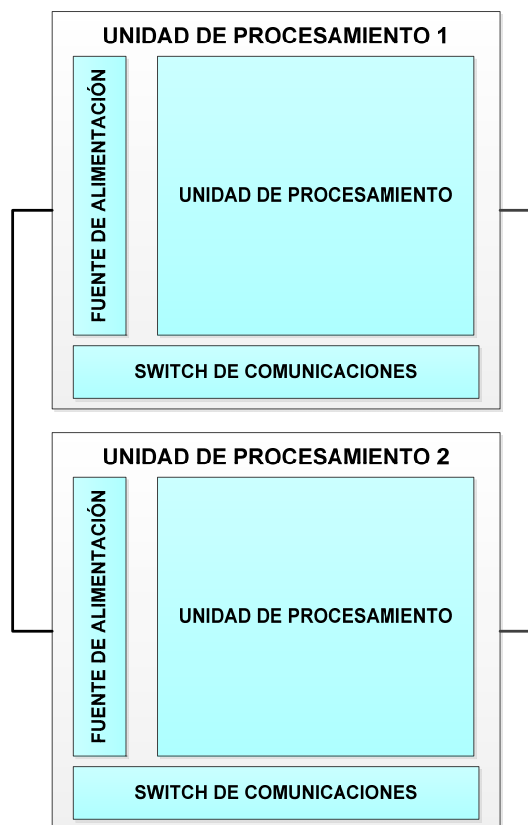
$$\text{Disponibilidad del Módulo Funcional} = UP \times FA \times SC$$

| Elemento de Unidad Funcional                              | Unidades | Disponibilidad Unidad | Disponibilidad Sistema |
|---|----------|-----------------------|------------------------|
| Unidad de Procesamiento (UP)                              | 4        | 0,999999497           | 0,99999999             |
| Fuente de Alimentación (FA)                               | 4        | 0,999993842           | 0,99997537             |
| Switch de Comunicaciones (SC)                             | 4        | 0,999998233           | 0,999992933            |
| <b>Disponibilidad Modulo Funcional Sistema de Vía</b>     |          |                       | <b>0,999968303</b>     |
| <b>Disponibilidad Modulo Funcional Sistema de Vía (%)</b> |          |                       | <b>99,99683029</b>     |

Tabla 30: Disponibilidad Unidad Central de Procesamiento Cantón Móvil

#### 5.1.2.4 Módulo Funcional Sistema de Bloqueo Móvil por Radio

El Sistema de Bloqueo Móvil por Radio es representado a partir del mismo módulo funcional que la Unidad Central de Procesamiento, compuesto por una fuente de alimentación, la unidad central de procesamiento (compuesta por los procesadores redundantes de cálculo) y un switch de comunicaciones. Cada una de las unidades del Sistema de Bloqueo Móvil por Radio compone de dos unidades con funcionamiento redundante.



*Ilustración 78: Módulo Funcional Sistema de Bloqueo Móvil por Radio*

#### 5.1.2.4.1 Listado de Material Sistema de Bloqueo Móvil por Radio

De acuerdo a la distribución de las unidades del Sistema de Bloqueo Móvil por Radio Procesamiento para el trazado definido (dos unidades redundantes), el listado de material para la unidad funcional del Sistema de Bloqueo Móvil por Radio:

| Elemento de Unidad Funcional | Unidad |
|------------------------------|--------|
| Unidad de Procesamiento      | 4      |
| Fuente de Alimentación       | 4      |
| Switch de Comunicaciones     | 4      |

*Tabla 31: Listado de Material Sistema de Bloqueo Móvil por Radio Cantón Móvil*

#### 5.1.2.4.2 Fiabilidad Sistema de Bloqueo Móvil por Radio

A continuación se presentan los distintos valores de fiabilidad expresados a través de los parámetros MTTF y Tasa de Fallo de cada uno de los componentes que componen el módulo funcional siendo:





$$\text{Tasa de Fallo} = \frac{\text{Unidades} \times \text{Horas} / \text{año}}{MTTF}$$

| Elemento de Unidad Funcional | MTTF   | Tasa de Fallo (f/año) |
|------------------------------|--------|-----------------------|
| Unidad de Procesamiento      | 994880 | 0,3522                |
| Fuente de Alimentación       | 81200  | 0,4315                |
| Switch de Comunicaciones     | 283000 | 0,1238                |

*Tabla 32: Fiabilidad Sistema de Bloqueo Móvil por Radio Cantón Móvil*

#### 5.1.2.4.3 Mantenibilidad Sistema de Bloqueo Móvil por Radio

A continuación se presentan los distintos valores de mantenibilidad expresados a través del parámetro MTTR de cada uno de los componentes que componen el módulo funcional:

| Elemento de Unidad Funcional | MTTR (h) |
|------------------------------|----------|
| Unidad de Procesamiento      | 0,5      |
| Fuente de Alimentación       | 0,5      |
| Switch de Comunicaciones     | 0,5      |

*Tabla 33: Mantenibilidad Sistema de Bloqueo Móvil por Radio Cantón Móvil*

#### 5.1.2.4.4 Disponibilidad Sistema de Bloqueo Móvil por Radio

A continuación se realiza el cálculo de disponibilidad del componente, así como del sistema completo siendo:

$$\text{Disponibilidad de la Unidad} = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR}$$

$$\text{Disponibilidad del Sistema} = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad \text{UNIDADES}$$

$$\text{Disponibilidad del Módulo Funcional} = UP \times FA \times SC$$

| Elemento de Unidad Funcional | Unidades | Disponibilidad Unidad | Disponibilidad Sistema |
|------------------------------|----------|-----------------------|------------------------|
| Unidad de Procesamiento (UP) | 4        | 0,999999497           | 0,99999999             |
| Fuente de Alimentación (FA)  | 4        | 0,999993842           | 0,99997537             |



| Elemento de Unidad Funcional                              | Unidades | Disponibilidad Unidad | Disponibilidad Sistema |
|---|----------|-----------------------|------------------------|
| Switch de Comunicaciones (SC)                             | 4        | 0,999998233           | 0,999992933            |
| <b>Disponibilidad Modulo Funcional Sistema de Vía</b>     |          |                       | <b>0,999968303</b>     |
| <b>Disponibilidad Modulo Funcional Sistema de Vía (%)</b> |          |                       | <b>99,99683029</b>     |

Tabla 34: Disponibilidad Sistema de Bloqueo Móvil por Radio Cantón Móvil

#### 5.1.2.5 Módulo Funcional Sistema de Señalización Embarcado Material Móvil

El Sistema de Señalización Embarcado en Material Móvil es representado a partir del módulo funcional que se representa a continuación, compuesto por una fuente de alimentación, la unidad central de procesamiento (compuesta por los procesadores redundantes de cálculo) y un switch de comunicaciones. Cada una de las Unidades Centrales de Proceso se compone de dos unidades con funcionamiento redundante.

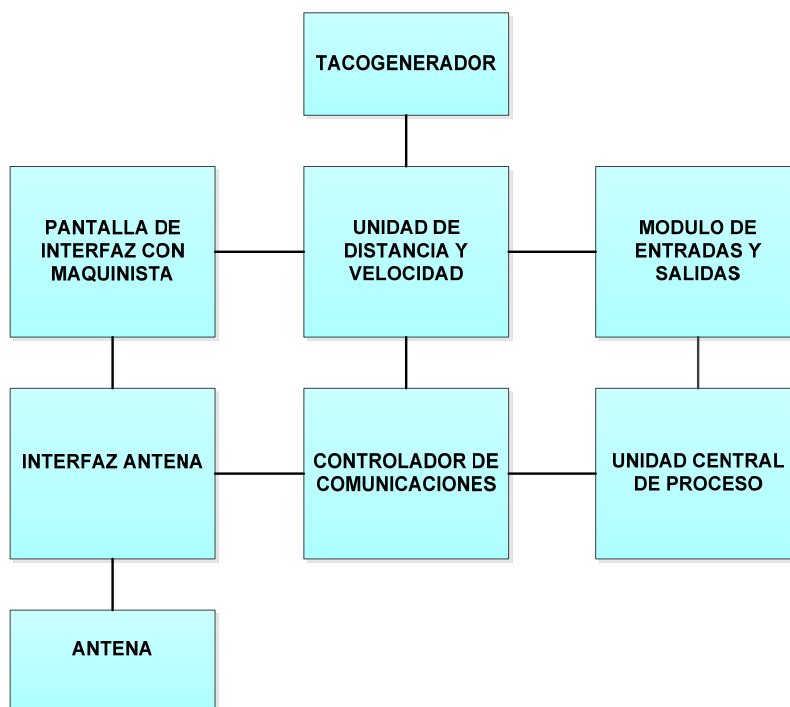


Ilustración 79: Módulo Funcional Sistema de Señalización Embarcado Material Móvil

#### 5.1.2.5.1 Listado de Material Sistema de Señalización Embarcado Material Móvil

Asumiendo que el número de trenes en la línea será igual a 17 trenes, y cada tren cuenta doble cabina, el listado de material para la unidad funcional del Sistema de Señalización Embarcado en Material Móvil está compuesto por:



| Elemento de Unidad Funcional        | Unidad | Total |
|-------------------------------------|--------|-------|
| Unidad Central de Proceso           | 4      | 68    |
| Unidad de Distancia y Velocidad     | 2      | 34    |
| Tacogenerador                       | 4      | 68    |
| Módulo de Entradas y Salidas        | 2      | 34    |
| Controlador de Comunicaciones       | 2      | 34    |
| Pantalla de Interfaz con Maquinista | 2      | 34    |
| Interfaz Antena                     | 2      | 34    |
| Antena                              | 2      | 34    |

Tabla 35: Listado de Material Sistema Señalización Embarcado Material Móvil Cantón Móvil

#### 5.1.2.5.2 Fiabilidad Sistema de Señalización Embarcado Material Móvil

A continuación se presentan los distintos valores de fiabilidad expresados a través de los parámetros MTTF y Tasa de Fallo de cada uno de los componentes que componen el módulo funcional siendo:

$$\text{Tasa de Fallo} = \frac{\text{Unidades} \times \text{Horas} / \text{año}}{\text{MTTF}}$$

| Elemento de Unidad Funcional        | MTTF    | Tasa de Fallo (f/año) |
|-------------------------------------|---------|-----------------------|
| Unidad Central de Proceso           | 800000  | 0,7446                |
| Unidad de Distancia y Velocidad     | 1600000 | 0,1861                |
| Tacogenerador                       | 1226250 | 0,4856                |
| Módulo de Entradas y Salidas        | 1000000 | 0,2978                |
| Controlador de Comunicaciones       | 1000000 | 0,2978                |
| Pantalla de Interfaz con Maquinista | 200000  | 1,4892                |
| Interfaz Antena                     | 184000  | 1,6187                |
| Antena                              | 1100000 | 0,2707                |

Tabla 36: Fiabilidad Sistema de Señalización Embarcado Material Móvil Cantón Móvil



#### 5.1.2.5.3 Mantenibilidad Sistema de Señalización Embarcado Material Móvil

A continuación se presentan los distintos valores de fiabilidad expresados a través del parámetro MTTR de cada uno de los componentes que componen el módulo funcional:

| Elemento de Unidad Funcional        | MTTR(h) |
|-------------------------------------|---------|
| Unidad Central de Proceso           | 2       |
| Unidad de Distancia y Velocidad     | 1       |
| Tacogenerador                       | 0,5     |
| Módulo de Entradas y Salidas        | 1       |
| Controlador de Comunicaciones       | 2       |
| Pantalla de Interfaz con Maquinista | 3       |
| Interfaz Antena                     | 1       |
| Antena                              | 1,5     |

*Tabla 37: Mantenibilidad Sistema de Señalización Embarcado Material Móvil Cantón Móvil*

#### 5.1.2.5.4 Disponibilidad Sistema de Señalización Embarcado Material Móvil

A continuación se realiza el cálculo de disponibilidad del componente, así como del sistema completo siendo:

$$\text{Disponibilidad de la Unidad} = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR}$$

$$\text{Disponibilidad del Sistema} = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad \text{UNIDADES}$$

$$\text{Disponibilidad del Módulo Funcional} = UP \times UDV \times TG \times MES \times CC \times PIM \times IA \times A$$

| Elemento de Unidad Funcional              | Unidades | Disponibilidad Unidad | Disponibilidad Sistema |
|---|----------|-----------------------|------------------------|
| Unidad Central de Proceso (UP)            | 68       | 0,9999975             | 0,999830015            |
| Unidad de Distancia y Velocidad (UDV)     | 34       | 0,999999375           | 0,99997875             |
| Tacogenerador (TG)                        | 68       | 0,999999592           | 0,999972274            |
| Módulo de Entradas y Salidas (MES)        | 34       | 0,999999              | 0,999966001            |
| Controlador de Comunicaciones (CC)        | 34       | 0,999998              | 0,999932002            |
| Pantalla de Interfaz con Maquinista (PIM) | 34       | 0,999985              | 0,999490134            |
| Interfaz Antena (IA)                      | 34       | 0,999994565           | 0,999815235            |



| Elemento de Unidad Funcional   | Unidades | Disponibilidad Unidad | Disponibilidad Sistema |
|--|----------|-----------------------|------------------------|
| Antena (A)   | 34       | 0,999998636           | 0,999953637            |
| <b>Disponibilidad Modulo Funcional Sistema de Señalización Embarcado en Material Móvil</b>     |          |                       | <b>0,998938445</b>     |
| <b>Disponibilidad Modulo Funcional Sistema de Señalización Embarcado en Material Móvil (%)</b> |          |                       | <b>99,89384455</b>     |

Tabla 38: Disponibilidad Sistema de Señalización Embarcado Material Móvil Cantón Móvil

## 5.2 Cálculo del Parámetro Coste

### 5.2.1 Sistema de Señalización de Cantón Fijo

#### 5.2.1.1 Coste del Material

A continuación se detalla el número de unidades, el coste unitario y el coste total de cada uno de los elementos que componen el Sistema de Señalización de Cantón Fijo:

| Elemento   | Unidades | Coste Unitario | Coste Total       |
|--|----------|----------------|-------------------|
| Señal Foco Verde y Rojo                            | 95       | 1963,64        | 186545,8          |
| Señal Foco Rojo                                    | 10       | 1347,73        | 13477,3           |
| Circuito 1Transmisor/1Receptor                     | 254      | 14003,67       | 3556932,18        |
| Circuito 1Transmisor/2Receptor                     | 29       | 16024,56       | 464712,24         |
| Aguja  | 34       | 12500          | 425000            |
| Balizas de Posicionamiento                         | 112      | 3245,67        | 363515,04         |
| <b>Total Sistema de Vía</b>                        |          |                | <b>5010182,56</b> |
| Subrack de Controlador                             | 33       | 3835,06        | 126556,98         |
| Fuente de Alimentación de Subrack                  | 17       | 3203,77        | 54464,09          |
| Tarjeta de Comunicaciones                          | 56       | 2657,38        | 148813,28         |
| Tarjeta Distribuidora de Energía                   | 33       | 941,41         | 31066,53          |
| Tarjeta Controladora de Circuito de Vía Codificado | 112      | 11519,87       | 1290225,44        |
| Tarjeta Controladora de Señal                      | 52       | 10315,05       | 536382,6          |



| Elemento   | Unidades | Coste Unitario | Coste Total        |
|--|----------|----------------|--------------------|
| Tarjeta Controladora de Aguja                    | 34       | 12645,9        | 429960,6           |
| Fuente de Alimentación de Señales                | 24       | 1406,31        | 33751,44           |
| <b>Total Sistema Controlador de Vía</b>          |          |                | <b>2651220,96</b>  |
| Unidad de Procesamiento                          | 4        | 17900          | 71600              |
| Fuente de Alimentación                           | 4        | 1115,2         | 4460,8             |
| Switch de Comunicaciones                         | 4        | 4160           | 16640              |
| <b>Total Unidad de Procesamiento</b>             |          |                | <b>92700,8</b>     |
| Equipamiento Sistema de Transmisión de Datos     | 4        | 20000          | 8000               |
| <b>Total Sistema de Transmisión de Datos</b>     |          |                | <b>80000</b>       |
| Unidad Central de Proceso                        | 68       | 20000          | 1360000            |
| Unidad de Distancia y Velocidad                  | 34       | 9100,15        | 309405,1           |
| Tacogenerador                                    | 68       | 5633,32        | 383065,76          |
| Módulo de Entradas y Salidas                     | 34       | 3015,22        | 102517,48          |
| Controlador de Comunicaciones                    | 34       | 5480,32        | 186330,88          |
| Pantalla de Interfaz con Maquinista              | 34       | 13572,97       | 461480,98          |
| Interfaz Antena                                  | 34       | 6914,1         | 235079,4           |
| Antena   | 34       | 2547,58        | 86617,72           |
| <b>Total Sistema de Señalización Embarcado</b>   |          |                | <b>3124497,32</b>  |
| Bastidor Circuito de Vía                         | 11       | 30508,99       | 335598,89          |
| Bastidor Unidad Central de Procesamiento         | 2        | 54358,24       | 108716,48          |
| Bastidor de Cables de Campo                      | 12       | 47632,68       | 571592,16          |
| Bastidor Sistema Controlador Equipamiento de Vía | 15       | 12907,78       | 193616,7           |
| Bastidor Sistema de Señalización Embarcado       | 34       | 40948,44       | 1392246,96         |
| <b>Total Bastidores Equipos de Señalización</b>  |          |                | <b>2601771,19</b>  |
| <b>TOTAL MATERIALES</b>                          |          |                | <b>13560372,83</b> |

Tabla 39: Coste del Material Cantón Fijo



#### 5.2.1.2 Costes de Ejecución: desarrollo, pruebas y puesta en servicio

A continuación se detalla la duración de la actividad, el número de personal especializado en la solución de señalización requerida y el coste de ejecución para el desarrollo, pruebas y puesta en servicio del Sistema de Señalización de Cantón Fijo:

Para ello, se establecen los siguientes parámetros de proyecto:

**Duración de Proyecto** = 1, 5 años

**Coste de Hora de Personal Especializado en Sistemas de Señalización de Cantón Fijo** = 50 euros

| Elemento   | Duración | Personal | Coste Total |
|--|----------|----------|-------------|
| Gestión y Dirección del Proyecto   | 1,5      | 2        | 240000      |
| Análisis de Perturbaciones en el tramo e Informe de Replanteo                              | 0,1      | 1        | 8000        |
| Ingeniería de Desarrollo y Sistema de Señalización Embarcado y sus interfaces              | 1        | 4        | 320000      |
| Ingeniería de Desarrollo Unidad Central de Procesamiento y sus interfaces                  | 1        | 4        | 320000      |
| Ingeniería de Desarrollo Sistema Controlador de Equipamiento de Vía y sus interfaces       | 0,75     | 3        | 180000      |
| Ingeniería de Aplicación Sistema de Señalización Embarcado                                 | 0,4      | 3        | 96000       |
| Ingeniería de Aplicación Unidad Central de Procesamiento                                   | 0,7      | 3        | 168000      |
| Ingeniería de Aplicación Sistema Controlador De Equipamiento de Vía                        | 0,7      | 3        | 168000      |
| Pruebas y Puesta en Servicio Sistema de Señalización Embarcado                             | 1        | 4        | 320000      |
| Pruebas y Puesta en Servicio Unidad Central de Procesamiento                               | 0,3      | 2        | 48000       |
| Pruebas y Puesta en Servicio Sistema Controlador de Equipamiento de Vía                    | 0,5      | 4        | 160000      |
| Pruebas de Integración Sistema de Señalización Embarcado y Sistema de Vía                  | 0,7      | 4        | 224000      |
| Pruebas de Integración Sistema de Señalización Embarcado y Unidad Central de Procesamiento | 0,15     | 2        | 24000       |





| Elemento  | Duración | Personal | Coste Total    |
|---|----------|----------|----------------|
| Pruebas de Integración Unidad Central de Procesamiento y Sistema Controlador de Equipamiento de Vía | 0,15     | 2        | 24000          |
| Pruebas de Integración Sistema Controlador de Equipamiento de Vía y Equipamiento de Vía             | 0,2      | 4        | 64000          |
| Cumplimentación de Documentación para Puesta en Servicio  | 0,15     | 4        | 48000          |
| Cursos de Formación del Sistema   | 0,1      | 1        | 8000           |
| <b>TOTAL EJECUCIÓN</b>  |          |          | <b>2420000</b> |

*Tabla 40: Costes de Ejecución: desarrollo, pruebas y puesta en servicio Cantón Fijo*

#### 5.2.1.3 Coste de Mantenimiento

A continuación se detalla el coste de mantenimiento estimado para el Sistema de Señalización de Cantón Fijo asumiendo que el mantenimiento preventivo será realizado por la administración ferroviaria y será sólo responsabilidad del suministrador, la asistencia técnica para mantenimiento correctivo:

| Elemento                                      | Coste Unitario | Años | Coste Total    |
|---|----------------|------|----------------|
| Mantenimiento Correctivo – Asistencia Técnica | 350000         | 20   | 7000000        |
| <b>TOTAL MANTENIMIENTO CORRECTIVO</b>         |                |      | <b>7000000</b> |

*Tabla 41: Coste de Mantenimiento Cantón Fijo*

#### 5.2.1.4 Coste Total

A continuación, se detalla el coste total estimado del Sistema de Señalización de Cantón Fijo tras la suma del coste de material, coste de ejecución y el coste de mantenimiento:

| Elemento   | Coste Total        |
|--|--------------------|
| Materiales                                       | 13560372,83        |
| Ejecución  | 2420000            |
| Mantenimiento Correctivo – Asistencia Técnica    | 7000000            |
| <b>TOTAL SISTEMA DE SEÑALIZACIÓN CANTÓN FIJO</b> | <b>15980372,83</b> |

*Tabla 42: Coste Total Cantón Fijo*



## 5.2.2 Sistema de Señalización de Cantón Móvil

### 5.2.2.1 Coste del Material

A continuación se detalla el número de unidades, el coste unitario y el coste total de cada uno de los elementos que componen el Sistema de Señalización de Cantón Móvil:

| Elemento  | Unidades | Coste Unitario | Coste Total       |
|---|----------|----------------|-------------------|
| Aguja   | 34       | 12500          | 425000            |
| Balizas de Posicionamiento                      | 222      | 3245,67        | 720538,74         |
| Concentrador de Radio                           | 80       | 30452,36       | 2436188,8         |
| Antenas de Radio                                | 112      | 1383,69        | 154973,28         |
| <b>Total Sistema de Vía</b>                     |          |                | <b>3736700,82</b> |
| Subrack de Controlador                          | 9        | 3835,06        | 34515,54          |
| Fuente de Alimentación de Subrack               | 5        | 3203,77        | 16018,85          |
| Tarjeta de Comunicaciones                       | 10       | 2657,38        | 26573,8           |
| Tarjeta Distribuidora de Energía                | 9        | 941,41         | 8472,69           |
| Tarjeta Controladora de Aguja                   | 34       | 12645,9        | 429960,6          |
| <b>Total Sistema Controlador de Vía</b>         |          |                | <b>515541,48</b>  |
| Unidad de Procesamiento                         | 4        | 17900          | 71600             |
| Fuente de Alimentación                          | 4        | 1115,2         | 4460,8            |
| Switch de Comunicaciones                        | 4        | 4160           | 16640             |
| <b>Total Unidad de Procesamiento</b>            |          |                | <b>92700,8</b>    |
| Unidad de Procesamiento                         | 4        | 17900          | 71600             |
| Fuente de Alimentación                          | 4        | 1115,2         | 4460,8            |
| Switch de Comunicaciones                        | 4        | 4160           | 16640             |
| <b>Total Sistema de Bloqueo Móvil por Radio</b> |          |                | <b>92700,8</b>    |
| Equipamiento Sistema de Transmisión de Datos    | 4        | 116677         | 466708            |
| <b>Total Sistema de Transmisión de Datos</b>    |          |                | <b>466708</b>     |
| Unidad Central de Proceso                       | 68       | 20000          | 1360000           |
| Unidad de Distancia y Velocidad                 | 34       | 9100,15        | 309405,1          |
| Tacogenerador                                   | 68       | 5633,32        | 383065,76         |
| Módulo de Entradas y Salidas                    | 34       | 3015,22        | 102517,48         |



| Elemento   | Unidades | Coste Unitario | Coste Total        |
|--|----------|----------------|--------------------|
| Controlador de Comunicaciones                    | 34       | 5480,32        | 186330,88          |
| Pantalla de Interfaz con Maquinista              | 34       | 13572,97       | 461480,98          |
| Interfaz Antena                                  | 34       | 6914,1         | 235079,4           |
| Antena   | 34       | 2547,58        | 86617,72           |
| <b>Total Sistema de Señalización Embarcado</b>   |          |                | <b>3124497,32</b>  |
| Bastidor Unidad Central de Procesamiento         | 2        | 54358,24       | 108716,48          |
| Bastidor Sistema Bloqueo Móvil por Radio         | 2        | 102323,5       | 204647             |
| Bastidor de Cables de Campo                      | 12       | 47632,68       | 571592,16          |
| Bastidor Sistema Controlador Equipamiento de Vía | 15       | 12907,78       | 193616,7           |
| Bastidor Sistema de Señalización Embarcado       | 34       | 40948,44       | 1392246,96         |
| <b>Total Bastidores Equipos de Señalización</b>  |          |                | <b>2470819,3</b>   |
| <b>TOTAL MATERIALES</b>                          |          |                | <b>10499668,52</b> |

Tabla 43: Coste del Material Cantón Móvil

#### 5.2.2.2 Coste de Ejecución: desarrollo, pruebas y puesta en servicio

A continuación se detalla la duración de la actividad, el número de personal especializado en la solución de señalización requerida y el coste de ejecución para el desarrollo, pruebas y puesta en servicio del Sistema de Señalización de Cantón Móvil:

Para ello, se establecen los siguientes parámetros de proyecto:

**Duración de Proyecto** = 2 años

**Coste de Hora de Personal Especializado en Sistemas de Señalización de Cantón Móvil** = 80 euros

| Elemento  | Duración | Personal | Coste Total |
|---|----------|----------|-------------|
| Gestión y Dirección de Proyecto   | 1,5      | 3        | 576000      |
| Análisis de perturbaciones en el tramo e Informe de Replanteo               | 0,1      | 1        | 12800       |
| Análisis de Cobertura Radio   | 0,3      | 1        | 38400       |
| Ingeniería de Desarrollo Sistema de Señalización Embarcado y sus interfaces | 1,5      | 8        | 1536000     |



| Elemento  | Duración | Personal | Coste Total |
|---|----------|----------|-------------|
| Ingeniería de Desarrollo Sistema de Bloqueo Móvil por Radio y sus interfaces                        | 1,5      | 8        | 1536000     |
| Ingeniería de Desarrollo Sistema de Transmisión de Datos y sus interfaces                           | 1        | 4        | 512000      |
| Ingeniería de Desarrollo Unidad Central de Procesamiento y sus interfaces                           | 1        | 4        | 512000      |
| Ingeniería de Desarrollo Sistema Controlador de Equipamiento de Vía y sus interfaces                | 0,4      | 2        | 102400      |
| Ingeniería de Aplicación Sistema de Señalización Embarcado y sus interfaces                         | 1        | 3        | 384000      |
| Ingeniería de Aplicación del Sistema de Bloqueo Móvil por Radio                                     | 1        | 3        | 384000      |
| Ingeniería de Aplicación Sistema de Transmisión de Datos  | 0,8      | 3        | 307200      |
| Ingeniería de Aplicación Unidad Central de Procesamiento  | 0,6      | 3        | 230400      |
| Ingeniería de Aplicación Sistema Controlador de Equipamiento de Vía                                 | 0,5      | 3        | 192000      |
| Pruebas y Puesta en Servicio Sistema de Señalización Embarcado                                      | 1,5      | 6        | 1152000     |
| Pruebas y Puesta en Servicio Sistema de Bloqueo Móvil por Radio                                     | 0,5      | 4        | 256000      |
| Pruebas y Puesta en Servicio Sistema de Transmisión de Datos S                                      | 0,5      | 4        | 256000      |
| Pruebas y Puesta en Servicio Unidad Central de Procesamiento  | 0,3      | 2        | 76800       |
| Pruebas y Puesta en Servicio Sistema Controlador de Equipamiento de Vía                             | 0,4      | 4        | 204800      |
| Pruebas de Integración Sistema de Señalización Embarcado y Sistema de Vía                           | 1,2      | 4        | 614400      |
| Pruebas de Integración Sistema de Señalización Embarcado y Sistema de Bloqueo Móvil por Radio       | 0,8      | 4        | 409600      |
| Pruebas de Integración Sistema de Bloqueo Móvil por Radio y Unidad Central de Procesamiento         | 0,6      | 4        | 307200      |
| Pruebas de Integración Unidad Central de Procesamiento y Sistema Controlador de Equipamiento de Vía | 0,1      | 2        | 25600       |



| Elemento  | Duración | Personal | Coste Total    |
|---|----------|----------|----------------|
| Pruebas de Integración Sistema Controlador de Equipamiento de Vía y Equipamiento de Vía | 0,15     | 2        | 38400          |
| Cumplimentación de Documentación para Puesta en Servicio                                | 0,3      | 6        | 230400         |
| Cursos de Formación del Sistema   | 0,3      | 2        | 76800          |
| <b>TOTAL EJECUCIÓN</b>  |          |          | <b>9971200</b> |

*Tabla 44: Coste de Ejecución: desarrollo, pruebas y puesta en servicio Cantón Móvil*

#### 5.2.2.3 Coste de Mantenimiento

A continuación se detalla el coste de mantenimiento estimado para el Sistema de Señalización de Cantón Móvil asumiendo que el mantenimiento preventivo será realizado por la administración ferroviaria y será sólo responsabilidad del suministrador, la asistencia técnica para mantenimiento correctivo:

| Elemento                                      | Coste Unitario | Años | Coste Total     |
|---|----------------|------|-----------------|
| Mantenimiento Correctivo – Asistencia Técnica | 1500000        | 20   | 30000000        |
| <b>TOTAL MANTENIMIENTO CORRECTIVO</b>         |                |      | <b>30000000</b> |

*Tabla 45: Coste de Mantenimiento Cantón Móvil*

#### 5.2.2.4 Coste Total

A continuación, se detalla el coste total estimado del Sistema de Señalización de Cantón Móvil tras la suma del coste de material, coste de ejecución, pruebas y puesta en servicio y el coste de mantenimiento:

| Elemento  | Coste Total        |
|---|--------------------|
| Materiales  | 10499668,52        |
| Ejecución   | 9971200            |
| Mantenimiento Correctivo – Asistencia Técnica     | 30000000           |
| <b>TOTAL SISTEMA DE SEÑALIZACIÓN CANTÓN MÓVIL</b> | <b>50470868,52</b> |

*Tabla 46: Coste Total Cantón Móvil*



## 5.3 Cálculo del Parámetro Tiempo de Recorrido de la Línea

Para el cálculo del parámetro del tiempo de recorrido de la línea, han sido introducidas en el programa de simulación las características del trazado de vía y las características del tren, detalladas en los capítulos anteriores.

Para el cálculo del tiempo de recorrido, se ha realizado la simulación de un solo tren, circulando en las máximas condiciones de velocidad por toda la línea. Este tiempo, será el mismo en ambas soluciones de señalización, puesto que para su cálculo no se consideran interferencias de otros trenes.

Para el cálculo, la línea ha sido dividida en cuatro secciones detalladas a continuación:

- Sección 1 → Compuesta por el tramo comprendido entre la Estación 1 y la Estación 12 recorrido de izquierda a derecha
- Sección 2 → Compuesta por el tramo comprendido entre la Estación 12 y la Estación 1 recorrido de derecha a izquierda.
- Sección 3 → Compuesta por el movimiento de vuelta desde la Estación 12
- Sección 4 → Compuesta por el movimiento de vuelta desde la Estación 1

El tiempo de recorrido de la línea será calculado como la suma de los tiempos de recorrido parciales, asumiendo que en el caso de las vueltas, éstas han sido diseñadas para ser recorridas en un tiempo de **90** segundos.

### 5.3.1 Precondiciones de Simulación

Para el cálculo de los tiempos de recorrido en las secciones 1 y 3, éste ha sido calculado utilizando el programa de simulación siendo las precondiciones de simulación:

- Sólo existirá un tren en la línea por lo que éste podrá progresar sin ninguna interferencia, en las máximas condiciones de velocidad, de acuerdo al perfil de velocidad calculado por el Sistema de Señalización Embarcado, teniendo en cuenta las restricciones civiles de la línea.
- Los trenes efectuarán paradas de 30 segundos en las estaciones para la subida y bajada de viajeros.

### 5.3.2 Cálculo de los Tiempos de Recorrido

Los resultados obtenidos tras la simulación de la Sección 1 y Sección 3 son detallados a continuación:

#### Sección 1

| Tramo                   | Distancia (m) | Tiempo de Recorrido (s) |
|-------------------------|---------------|-------------------------|
| Estación 1 – Estación 2 | 2242,9        | 171                     |
| Estación 2 – Estación 3 | 1686,9        | 135,8                   |
| Estación 3 – Estación 4 | 1536,3        | 129,1                   |



| Tramo  | Distancia (m)   | Tiempo de Recorrido (s) |
|--|-----------------|-------------------------|
| Estación 4 – Estación 5                          | 1126,5          | 118,6                   |
| Estación 5 – Estación 6                          | 1836,9          | 150,2                   |
| Estación 6 – Estación 7                          | 2036,1          | 150                     |
| Estación 7 – Estación 8                          | 907,2           | 98,1                    |
| Estación 8 – Estación 9                          | 1643,18         | 142,5                   |
| Estación 9 – Estación 10                         | 1632,12         | 145,6                   |
| Estación 10 – Estación 11                        | 1853,6          | 152,4                   |
| Estación 11- Estación 12                         | 3784,4          | 238,4                   |
| <b>TIEMPO DE RECORRIDO Y DISTANCIA SECCIÓN 1</b> | <b>20286, 1</b> | <b>1631,7</b>           |

Tabla 47: Tiempos de Recorrido Sección 1

### Sección 3

| Tramo  | Distancia (m) | Tiempo de Recorrido (s) |
|--|---------------|-------------------------|
| Estación 12 – Estación 11                        | 3784,2        | 238,5                   |
| Estación 11 – Estación 10                        | 1846,9        | 148                     |
| Estación 10 – Estación 9                         | 1631          | 147,1                   |
| Estación 9 – Estación 8                          | 1642,7        | 142,7                   |
| Estación 8 – Estación 7                          | 910,5         | 99,1                    |
| Estación 7 – Estación 6                          | 2035,7        | 149,7                   |
| Estación 6 – Estación 5                          | 1839,5        | 146                     |
| Estación 5 – Estación 4                          | 1122,7        | 117,3                   |
| Estación 4 – Estación 3                          | 1553,1        | 126,2                   |
| Estación 3 – Estación 2                          | 1681,2        | 135,5                   |
| Estación 2- Estación 1                           | 2229,5        | 171,2                   |
| <b>TIEMPO DE RECORRIDO Y DISTANCIA SECCIÓN 2</b> | <b>20277</b>  | <b>1621,3</b>           |

Tabla 48: Tiempos de Recorrido Sección 3

Una vez calculados los tiempos de recorrido de las Secciones 1 y 3, es posible calcular el tiempo total de recorrido siendo:

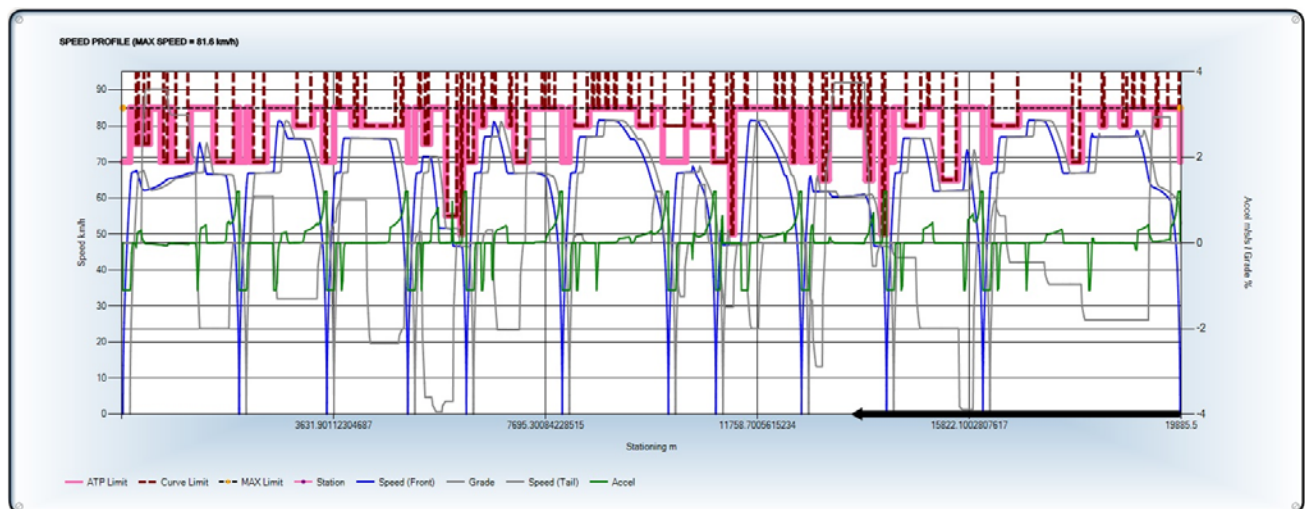
$$\text{Tiempo Total de Recorrido [TtR]} = TS1 + TS2 + TS3 + TS4 = 3433 \text{ segundos} = 57,21 \text{ minutos}$$



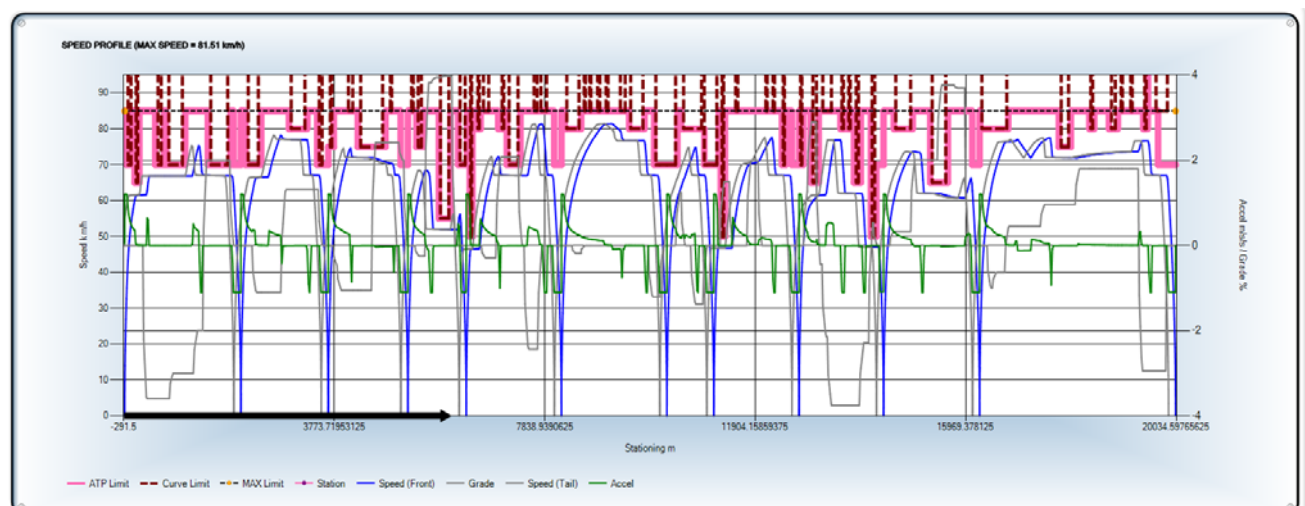


### 5.3.3 Análisis del Perfil de Velocidad

La simulación realizada en la Sección 1 y la Sección 3 ha dado como resultado las siguientes gráficas de velocidad que se muestran y analizan a continuación:



*Ilustración 80: Perfil de Velocidad Sección 1*



*Ilustración 81: Perfil de Velocidad Sección 2*

Como puede observarse en el perfil de velocidad (trazo azul), el valor de la velocidad será siempre inferior al valor de velocidad fijado por el Sistema de Señalización Embarcado (trazo rosa) evitándose así superar el límite calculado por el ATP y por tanto, las restricciones civiles impuestas.



Por otro lado, puede observarse como este límite se ajusta al perfil del radio de curvatura (trazo marrón) antes y después de la misma, de tal manera, que ni la cabeza ni la cola del tren supere en ningún momento el valor definido.

Para terminar, el perfil de velocidad muestra grandes picos de disminución de velocidad, coincidentes con la existencia de las estaciones y la correspondiente parada para la subida y bajada de pasajeros.

## 5.4 Cálculo del Parámetro Capacidad de la Línea

A la hora de obtener la capacidad de la línea, los parámetros determinantes son: el tiempo de recorrido y el tiempo entre trenes, calculado en el tramo que obliga al peor intervalo entre dos trenes consecutivos.

Tanto en la simulación del Sistema de Señalización de Cantón Fijo como en la simulación del Sistema de Señalización de Cantón Móvil, el tramo seleccionado para realizar el cálculo del tiempo entre trenes, es el tramo comprendido entre la Estación 6 y la Estación 8.

Este tramo, ha sido seleccionado como un tramo lo suficientemente representativo para el análisis, ya que comprende 3 estaciones y sus correspondientes inter-estaciones y ya que sus características de vía, relativas a la velocidad, radio de curvatura y gradiente podrían resultar limitantes para la capacidad de la línea.

### 5.4.1 Sistema de Señalización de Cantón Fijo

#### 5.4.1.1 Precondiciones de Simulación

Las precondiciones de simulación del Sistema de Señalización de Cantón Fijo serán las siguientes:

- Sólo podrá existir un tren en un cantón (representado por cuadrados en la simulación). Mientras el tren circule por el cantón, éste podrá progresar de acuerdo al perfil de velocidad calculado por el Sistema de Señalización embarcado. Sólo cuando el tren precedente abandone el cantón, el segundo tren podrá circularlo.
- Los trenes efectuarán paradas de 30 segundos en las estaciones para la carga y descarga de viajeros.

#### 5.4.1.2 Cálculo del Tiempo entre Trenes

Para el cálculo del tiempo entre trenes, se realiza la simulación de un solo tren en el tramo comprendido entre la Estación 6 y la Estación 8.

El programa de simulación obtiene, para un tren circulando bajo las condiciones de un Sistema de Señalización de Cantón Fijo entre las Estaciones 6 y 8 el siguiente tiempo:

| Tramo          | Tiempo entre trenes (s)<br>[TeT] |
|----------------|----------------------------------|
| S02207- S02353 | 63                               |



| Tramo           | Tiempo entre trenes (s)<br>[TeT] |
|-----------------|----------------------------------|
| S02353 - S02209 | 127,1                            |
| S02209 - S02211 | 172,8                            |

Tabla 49: Tiempo entre Trenes por Tramo Cantón Fijo

Teniendo en cuenta los tres tiempos, el tiempo limitante viene dado por el tramo comprendido entre la Estación 7 y la Estación 8 (S02209 - S02211). Esto es debido a que el tramo comprendido entre la Estación 6 y la Estación 7 se ha definido dos cantones, mientras que entre la Estación 7 y Estación 8, se ha definido un único cantón. Tal y como era de esperar, el tramo con un único cantón penaliza el intervalo entre trenes.

Por tanto, el tiempo entre trenes será:

| Tramo           | Tiempo entre trenes (s)<br>[TeT] |
|-----------------|----------------------------------|
| S02209 – S02211 | 172,8                            |

Tabla 50: Tiempo entre Trenes Cantón Fijo

#### 5.4.1.3 Secuencia de Recorrido

Una vez definido el tiempo entre trenes, se simula la existencia de las estaciones en la línea, representadas como parámetros singulares (identificadas con un brillante) y las señales (identificadas con un cuadrado) tal y como se detalla a continuación:

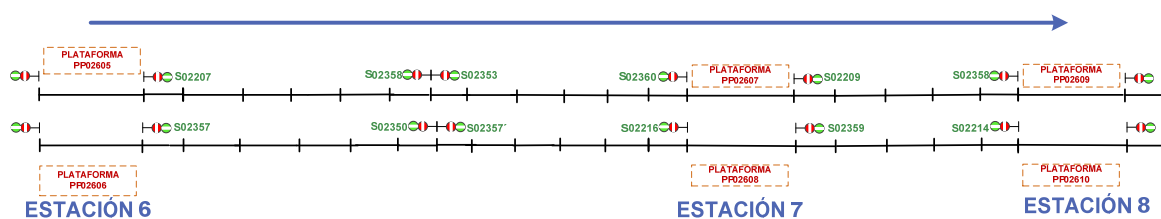


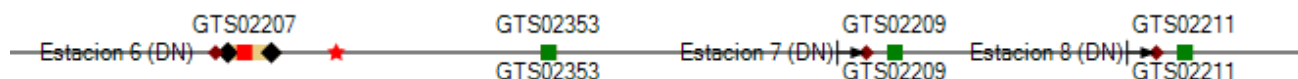
Ilustración 82: Tramo Estación 6 Estación 8 - Cantón Fijo



Ilustración 83: Simulación Estaciones y Señales Cantón Fijo

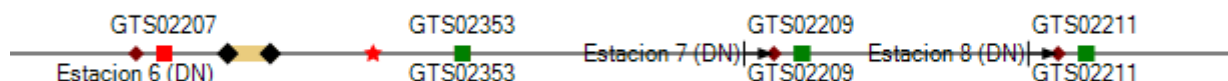


Una vez definidas, se inyecta el primer tren en la línea y se ejecuta la simulación obteniendo la siguiente secuencia de recorrido. Como puede verse en la simulación, en cuanto el primer tren rebasa la primera señal (S0227), ésta pasa a mostrar aspecto rojo evitando la entrada de un segundo tren.



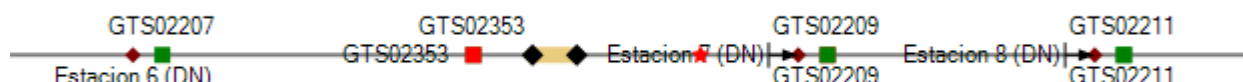
*Ilustración 84: Primer Tren Saliendo de Estación 6*

Como puede verse en la simulación, el primer tren inicia la secuencia de recorrido entre la Estación 6 y la Estación 7:



*Ilustración 85: Primer Tren entre Estación 6 y Estación 7*

El primer tren rebasa la señal de inter-estación (S02353) pasando a mostrar ésta aspecto rojo, evitando la entrada de un segundo tren y produciéndose la apertura de la señal anterior (S02207). El primer tren inicia su marcha desde la señal de inter-estación a la Estación 7.



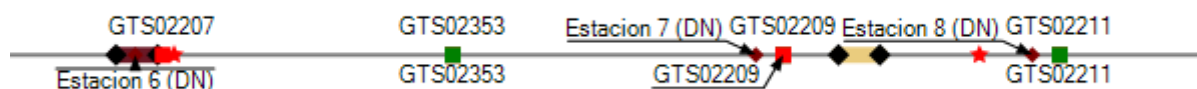
*Ilustración 86: Primer tren rebasa la inter-estación*

El primer tren llega a la Estación 7 e inicia la subida y bajada de viajeros:



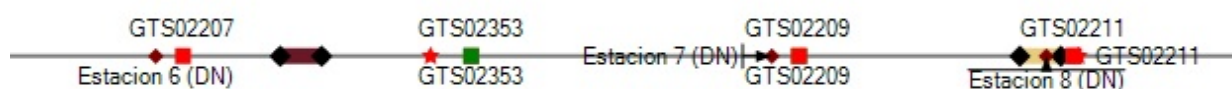
*Ilustración 87: Primer Tren en Estación 7*

Mientras el primer tren realiza el recorrido entre la Estación 7 y la Estación 8, cerrando por tanto la señal de salida de estación (S0229), el segundo tren inicia su recorrido saliendo de la Estación 6:



*Ilustración 88: Segundo Tren sale de Estación 6 - Primer tren entre Estación 7 y Estación 8*

Mientras el segundo tren realiza el recorrido entre la Estación 6 y la Estación 7, el primer tren inicia la subida y bajada de viajeros en la Estación 8:



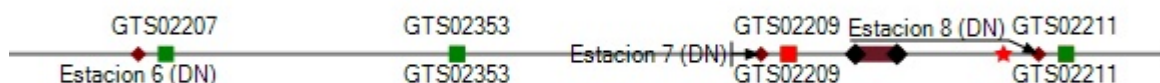
*Ilustración 89: Segundo tren entre Estación 6 y Estación 7 - Segundo tren en Estación 8*

Mientras el segundo tren comienza la subida y bajada de pasajeros en la Estación 7, el primer tren abandona la Estación 8 cerrando la señal de estación (S02211) y provocando la apertura de la señal anterior (S0229) que permitirá la salida de la estación del segundo tren:



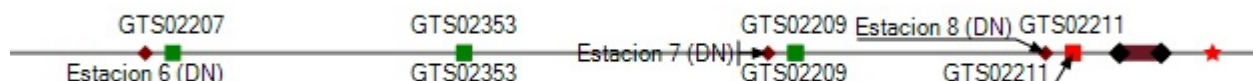
*Ilustración 90: Segundo tren en Estación 7 - Segundo tren sale de Estación 8*

El segundo tren realiza el recorrido entre la Estación 7 y la Estación 8:



*Ilustración 91: Segundo tren entre Estación 7 y Estación 8*

El segundo tren completa a su vez la subida y bajada de pasajeros y sale de la Estación 8, completándose así la secuencia de recorrido:



*Ilustración 92: Segundo tren sale de Estación 8*



#### 5.4.1.4 Cálculo de la Capacidad de la Línea

Por tanto, se puede concluir que la capacidad de la línea, expresada como en el número de trenes que circularán simultáneamente por la línea, con el tiempo entre trenes definido en el Sistema de Señalización de Cantón Fijo es:

$$\text{Capacidad de la Línea} = \frac{TtR}{TeT} = 19 \text{ trenes}$$

#### 5.4.2 Sistema de Señalización de Cantón Móvil

##### 5.4.2.1 Precondiciones de Simulación

Las precondiciones de simulación del Sistema de Señalización de Cantón Móvil serán las siguientes:

- Las ocupaciones virtuales de cada tren (representadas por una estrella en la simulación), podrán progresar de acuerdo al perfil de velocidad calculado por el Sistema de Señalización Embarcado mientras éstas no confluyan.
- Los trenes efectuarán paradas de 30 segundos en las estaciones para la carga y descarga de viajeros.

##### 5.4.2.2 Cálculo del Tiempo entre Trenes

El programa de simulación obtiene, para un tren circulando bajo las condiciones de un Sistema de Señalización de Cantón Móvil, el intervalo entre trenes considerando que un segundo tren jamás solaparía su ocupación virtual con la ocupación virtual del tren precedente, obteniendo el siguiente resultado:

| Tramo                   | Tiempo entre trenes (s)<br>[TeT] |
|-------------------------|----------------------------------|
| Estación 6 – Estación 8 | 79                               |

*Tabla 51: Tiempo entre Trenes por Tramo Cantón Móvil*

El tiempo ha sido mejorado con respecto al tiempo obtenido en el cantón fijo porque las señales han dejado de funcionar como un factor limitante, siendo el factor limitante en este caso únicamente la ocupación virtual del tren precedente.

Teniendo en cuenta que las vueltas de la línea han sido diseñadas para obtener un tiempo de vuelta de 90 segundos, y que éste sería el peor intervalo entre trenes existente, en el caso del Sistema de Señalización de Cantón Móvil, serán las secciones de vuelta (Secciones 3 y 4) las que actúen como factor limitante, definiendo éstas el tiempo entre trenes que pasará a ser:



| Tramo           | Tiempo entre trenes (s)<br>[TeT] |
|-----------------|----------------------------------|
| Secciones 3 y 4 | 90                               |

Tabla 52: Tiempo entre Trenes Cantón Móvil

Como ha ocurrido en el caso objeto de estudio, el tiempo de vuelta ha resultado ser el factor limitante para el cálculo del intervalo entre trenes en el caso del Sistema de Señalización de Cantón Móvil, puesto que en este caso, empeora el intervalo entre trenes calculado. En conclusión, en el Sistema de Señalización de Cantón Móvil, el diseño de las vueltas debe ser estudiado de una manera minuciosa considerando todas las posibles alternativas que lo mejoren.

#### 5.4.2.3 Secuencia de Recorrido

Una vez definido el tiempo entre trenes, se simula la existencia de las estaciones en la línea, representadas como parámetros singulares (identificadas con un brillante), tal y como se detalla a continuación:

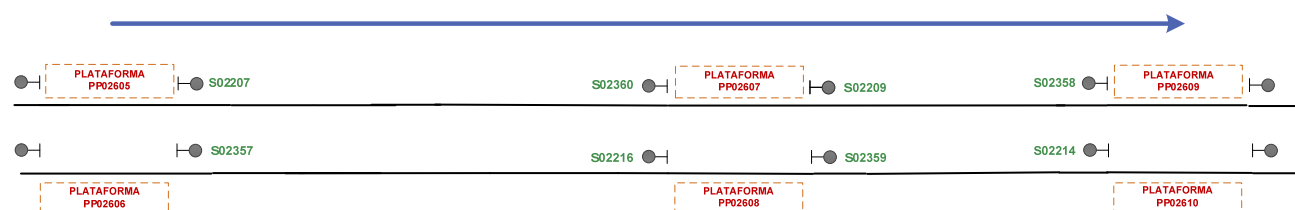


Ilustración 93: Tramos Estación 6 - Estación 8 - Cantón Móvil



Ilustración 94: Simulación Estaciones Cantón Móvil

Una vez definidas, se inyecta el primer tren en la línea y se ejecuta la simulación obteniendo la siguiente secuencia de recorrido:



Ilustración 95: Primer Tren saliendo de la Estación 6





Como puede verse en la simulación, el primer tren inicia la secuencia de recorrido entre la Estación 6 y la Estación 7. Tal y como puede observarse en la figura, la ocupación virtual se prolonga a medida que aumenta la velocidad del tren:



*Ilustración 96: Primer Tren entre Estación 6 y Estación 7*

Antes de que el primer tren llegue a la Estación 7, el segundo tren inicia su recorrido saliendo de la Estación 6. Tal y como puede observarse en la figura, la ocupación virtual del segundo tren permanece retraída mientras el tren no inicia la marcha:



*Ilustración 97: Segundo Tren sale de Estación 6 - Primer Tren llegando a Estación 7*

Mientras el segundo tren realiza el recorrido entre la Estación 6 y la Estación 7, el primer tren inicia la carga y descarga de viajeros en la Estación 7:



*Ilustración 98: Primer tren entre Estación 6 y Estación 7 - Segundo tren en Estación 7*

Antes de que el segundo tren llegue a la Estación 7, el primer tren completa la carga/descarga de pasajeros y sale de la Estación 7:



*Ilustración 99: Primer tren abandona Estación 7 antes de la llegada del Segundo tren*

Mientras el primer tren realiza el recorrido entre la Estación 7 y la Estación 8, el segundo tren inicia la carga y descarga de viajeros en la Estación 7:



*Ilustración 100: Segundo tren en Estación 7 - Primer tren entre Estación 7 y Estación 8*

Mientras el segundo tren realiza el recorrido entre la Estación 7 y la Estación 8, el primer tren inicia la carga y descarga de viajeros en la Estación 8:



*Ilustración 101: Primer tren en Estación 8 - Segundo tren entre Estación 7 y Estación 8*

Antes de que el segundo tren llegue a la Estación 8, el primer tren completa la carga/descarga de pasajeros y sale de la Estación 8:



*Ilustración 102: Primer tren abandona Estación 8 antes de la llegada del Segundo tren*

El segundo tren completa a su vez la carga y descarga de pasajeros y sale de la Estación 8, cerrándose así la secuencia de recorrido:



*Ilustración 103: Segundo tren abandona la Estación 8*

#### 5.4.2.4 Cálculo de la Capacidad de la Línea

Por tanto, se puede concluir que la capacidad de la línea expresada como en el número de trenes que circularán simultáneamente por la línea, con el tiempo entre trenes definido en el Sistema de Señalización de Cantón Móvil es:

$$\text{Capacidad de la Línea} = \frac{TtR}{TeT} = 38 \text{ trenes}$$



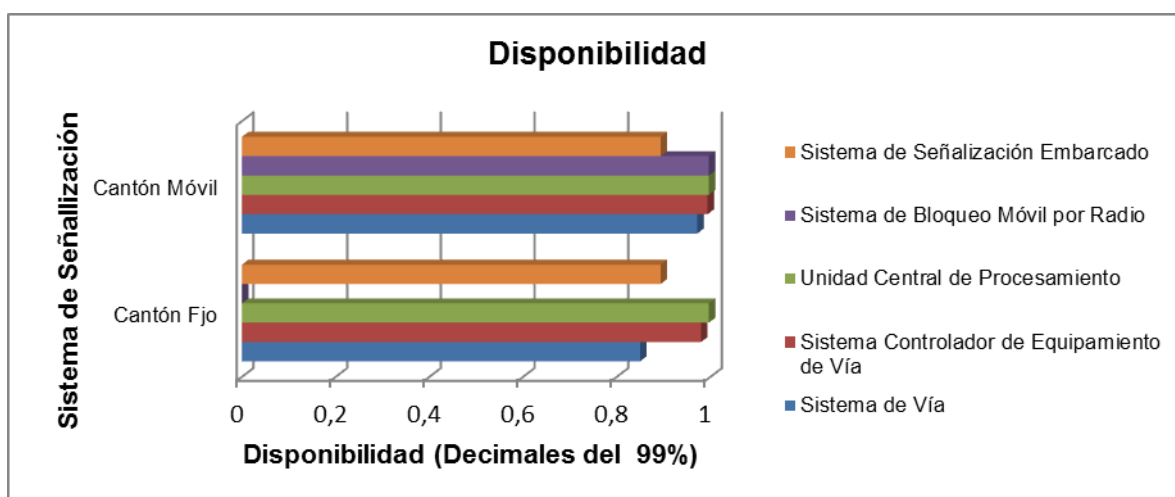
## 6 CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

### 6.1 Relación entre los parámetros calculados y el resultado obtenido

En el siguiente capítulo, se presentarán los parámetros calculados y a continuación se analizará el resultado obtenido.

#### 6.1.1 Comparativa Disponibilidad

De acuerdo a los cálculos realizados en el capítulo anterior, a continuación se muestra la gráfica comparativa para la Disponibilidad de ambos sistemas:



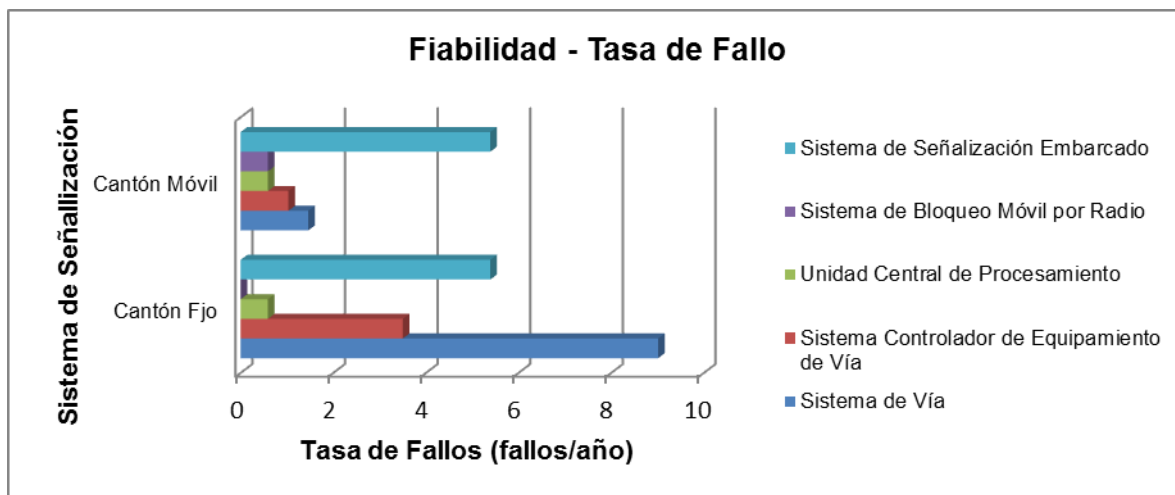
*Ilustración 104: Gráfica Comparativa Disponibilidad*

Tal y como se puede apreciar en la gráfica, la disponibilidad en el Sistema de Señalización de Cantón Móvil es superior a la disponibilidad del Sistema de Señalización de Cantón Fijo.

Puesto que los valores de mantenibilidad de los componentes son los mismos, el factor determinante es la fiabilidad.

La diferencia de fiabilidad existe en el Sistema Equipamiento de Vía y en el Sistema Controlador de Equipamiento de Vía.

Esta diferencia de fiabilidad puede observarse claramente en los resultados obtenidos en el cálculo de la Tasa de Fallos de ambos sistemas:



*Ilustración 105: Gráfica Comparativa Fiabilidad – Tasa de Fallo*

En el caso del Equipamiento de Vía, al analizar los datos en detalle, puede observarse, como el elemento Circuito de Vía, inexistente en el Sistema de Señalización de Cantón Móvil, presenta un número de fallos por año significativo (6, 35 fallos/año), lo que aumenta el número total de fallos del Sistema de Señalización de Cantón Fijo, siendo por ejemplo, inapreciable, la contribución en la tasa de fallo de otro de los elementos del Sistema de Vía, característico del Sistema de Señalización de Cantón Fijo, como es la señal (0,76 fallos/año).

En el caso del Sistema Controlador de Equipamiento de Vía, la contribución a la tasa de fallo es mayor en el Sistema de Señalización de Cantón Fijo debido a que el número de elementos de vía a controlar es también mayor.

Para concluir, podría establecerse, que teniendo en cuenta los elementos comparados, la fiabilidad del Sistema de Señalización de Cantón Fijo es inferior a la fiabilidad del Sistema de Señalización de Cantón Móvil, lo que disminuye significativamente su disponibilidad.

#### 6.1.2 Comparativa Costes – Coste de Materiales, Ejecución y Mantenimiento

De acuerdo a los cálculos realizados en el capítulo anterior, a continuación se muestra la gráfica comparativa para los costes de material, ejecución y mantenimiento de ambos sistemas:

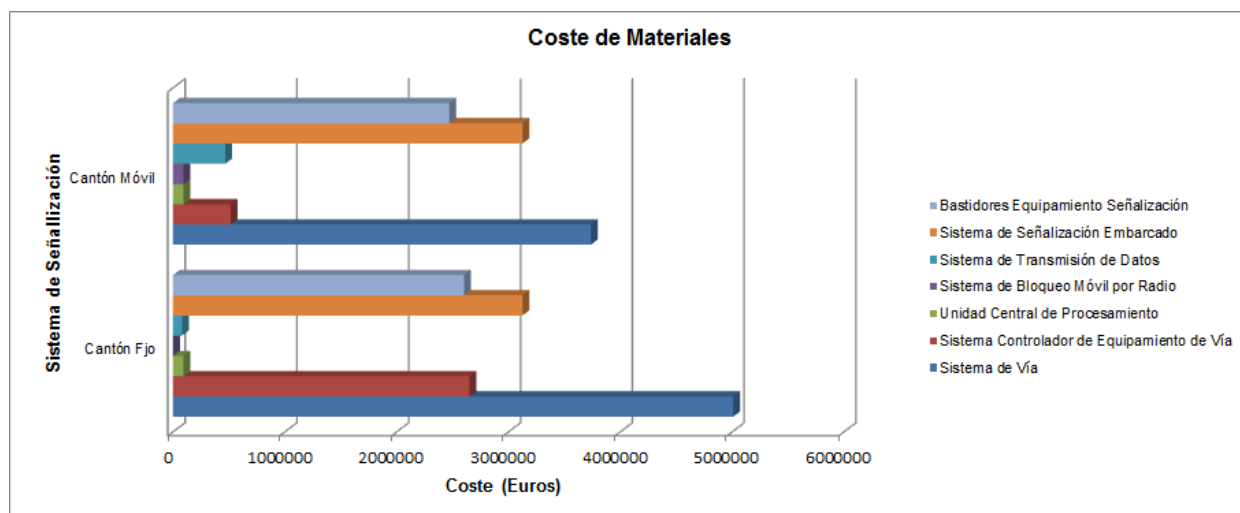


Ilustración 106: Gráfica Comparativa Coste – Materiales

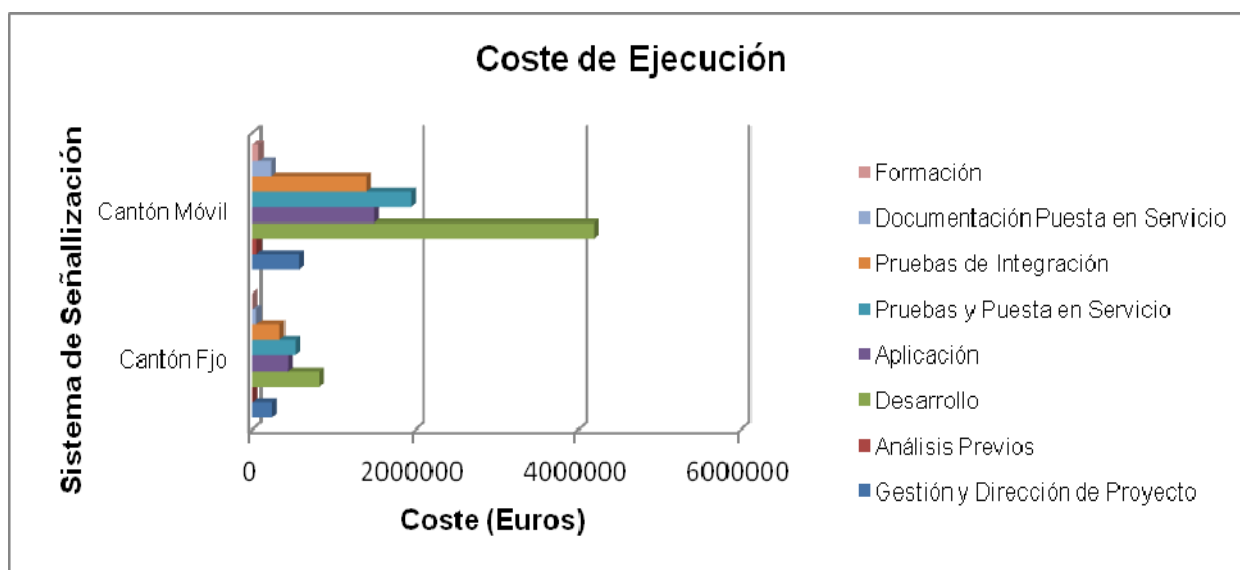
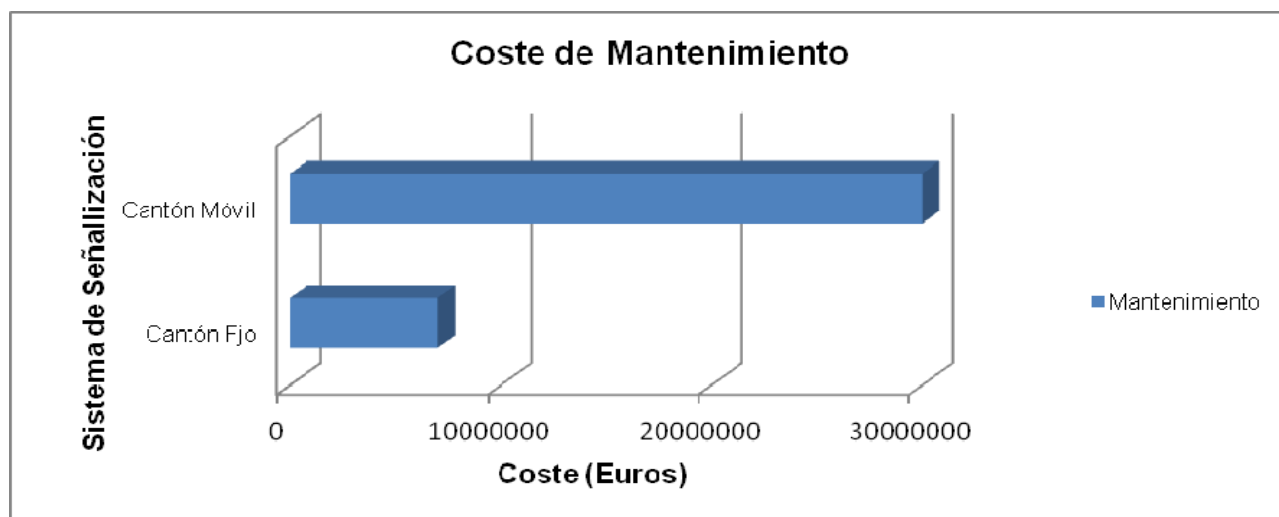


Ilustración 107: Gráfica Comparativa Coste – Ejecución



*Ilustración 108: Gráfica Comparativa Coste - Mantenimiento*

Tal y como se puede apreciar en las gráficas, los costes totales asociados al Sistema de Señalización de Cantón Móvil son superiores a los costes totales del Sistema de Señalización de Cantón Fijo.

Esta diferencia es debida a los costes de ejecución y mantenimiento, puesto que en el caso del coste de materiales, ocurre lo contrario, siendo éstos superiores en el caso del Sistema de Señalización de Cantón Fijo.

Analizando los datos en detalle, puede observarse que esto es debido a que el material necesario para el Sistema de Vía y el Sistema Controlador de Equipamiento de Vía es mayor, no viéndose compensada esta diferencia por la existencia del Sistema de Bloqueo Móvil por Radio o por el aumento de complejidad del Sistema de Transmisión de Datos.

En el caso de los costes de ejecución y mantenimiento, éstos son significativamente mayores en el Sistema de Señalización de Cantón Móvil.

En los costes de ejecución, la diferencia se debe a la necesidad de desarrollos más complejos, realizados por personal más especializado, por lo que las pruebas y la propia puesta en servicio de los mismos, resulta a su vez más compleja y por tanto, más costosa.

En los costes de mantenimiento, el factor determinante que incrementa el coste del Sistema de Señalización de Cantón Móvil, es la necesidad de contar con personal muy cualificado que sea capaz de resolver averías en instalaciones de gran complejidad, así como la necesidad de contar con herramientas de mantenimiento desarrolladas en ocasiones, específicamente para el uso de la Administración ferroviaria.

### 6.1.3 Comparativa Intervalo entre Trenes - Capacidad de la Línea

De acuerdo a los cálculos realizados en el capítulo anterior, a continuación se muestra la gráfica comparativa para el tiempo entre trenes y la capacidad de la línea de ambos sistemas:

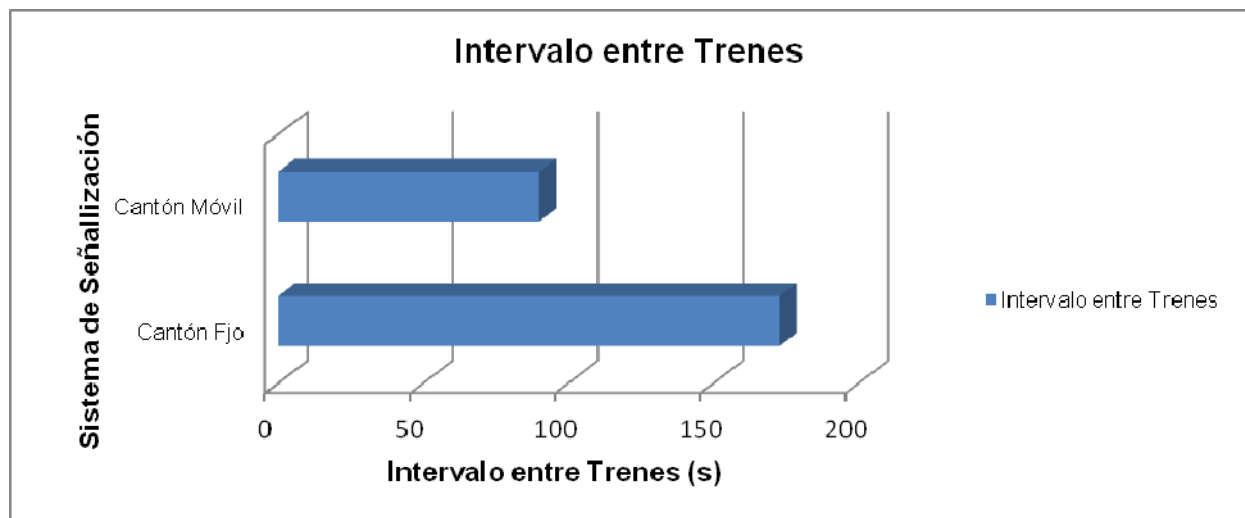


Ilustración 109: Gráfica Comparativa - Intervalo entre Trenes

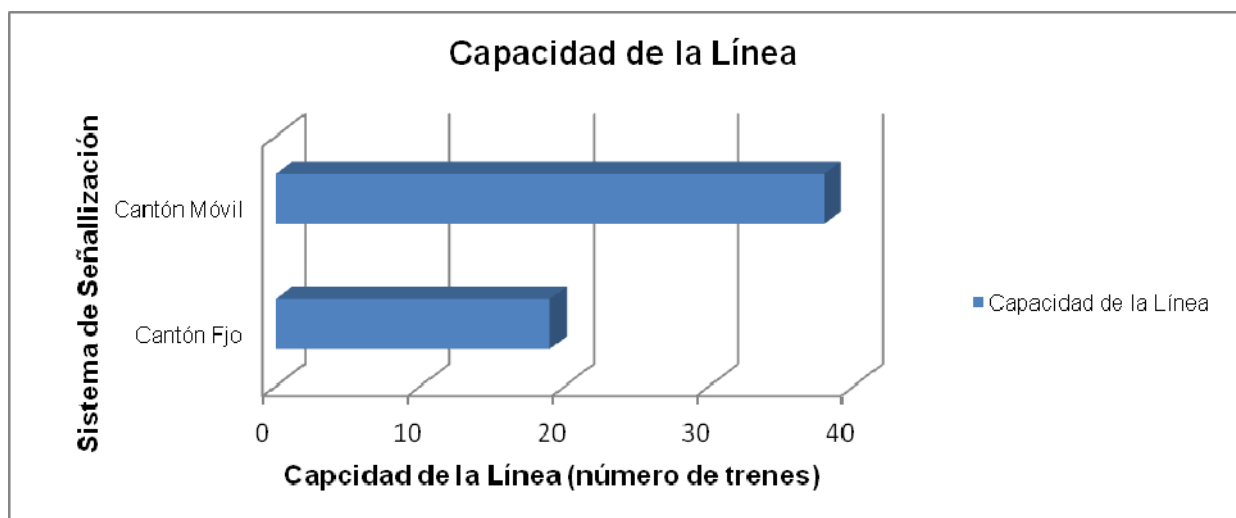


Ilustración 110: Gráfica Comparativa - Capacidad de la Línea

Tal y como se puede apreciar en las gráficas, el Intervalo entre trenes y por tanto la Capacidad de la Línea asociados al Sistema de Señalización de Cantón Móvil son superiores a los obtenidos para el Sistema de Señalización de Cantón Fijo.

La diferencia obtenida para el Intervalo entre trenes es debida a la desaparición de las señales en el Sistema de Señalización de Cantón Móvil como elemento separador entre trenes, lo que provoca que sólo la existencia de otro tren establezca el tiempo entre ellos.

La existencia de un intervalo de casi el doble mejor en el Sistema de Señalización de Cantón Móvil hace posible a su vez, una mejor Capacidad de la Línea, es decir, un mayor número de trenes circulando en la línea, lo que finalmente se traduce en un mayor número de pasajeros transportados.





## 6.2 Elección del Sistema de Señalización

Tal y como se ha comprobado en los capítulos anteriores, la elección del Sistema de Señalización de un sistema metropolitano para una ciudad concreta, no es una actividad trivial, sino una actividad que incluye numerosos aspectos, tales como la disponibilidad, los costes y la capacidad de transporte de la línea.

De acuerdo a los cálculos realizados, existe una gran diferencia tanto en los costes de cada uno de los Sistemas de Señalización, como en la capacidad de transporte de cada uno de ellos, por lo que la elección del Sistema de Señalización dependerá en gran medida de la capacidad de inversión de la ciudad y de la demanda de pasajeros que en este momento y en el futuro se vaya a realizar.

De acuerdo al cálculo de la capacidad de la línea obtenido para ambos sistemas, el número de viajeros que un Sistema de Señalización de Cantón Fijo podría transportar al año, utilizando para ello, el tren modelizado en el proyecto, es de 860.724 pasajeros al día, mientras que en un Sistema de Señalización de Cantón Móvil, el número asciende a 1.721.456 pasajeros al día, lo que nos permite estimar si estos sistemas cumplirían las exigencias de capacidad de algunos de los metros del mundo:

| Ciudad    | Demanda de Pasajeros por año         |
|-----------|--------------------------------------|
| París     | 1642 millones de pasajeros (2013)    |
| Londres   | 1014 millones de pasajeros (2006)    |
| Madrid    | 557 millones de pasajeros (2013)     |
| Barcelona | 375,72 millones de pasajeros ( 2014) |
| Valencia  | 51, 67 millones de pasajeros (2014)  |
| Sevilla   | 14,45 millones de pasajeros (2014)   |

*Tabla 53: Demanda de Pasajeros por año*

Tal y como puede observarse, en la tabla adjunta, para grandes ciudades como Londres, Madrid, París o Barcelona, la demanda de pasajeros obliga a la inversión en el Sistema de Señalización de Cantón Móvil, mientras que en ciudades como Sevilla y Valencia, la demanda de pasajeros no justifica la inversión en un Sistema de Señalización de Cantón Móvil, pudiendo el Sistema de Señalización de Cantón Fijo cumplir las expectativas de demanda, siempre que la proyección a futuro de la demanda no indique que el Sistema de Señalización de Cantón Fijo resultará insuficiente en el futuro.

Debe tenerse en cuenta que esta elección puede realizarse de manera parcial, es decir, dotar de las líneas de mayor demanda de pasajeros con un Sistema de Señalización de Cantón Móvil e instalar en el resto de las líneas con menor demanda un Sistema de Señalización de Cantón Fijo, de tal manera que el coste se mantenga controlado y la capacidad de transporte satisfaga las necesidades. Este modelo ha sido el elegido por ejemplo en la ciudad de Madrid, donde sólo las Líneas 1 y 6 están dotadas de un Sistema de Señalización de Cantón Móvil, siendo actualmente las líneas que mayor número de pasajeros transportan al año.



Desde el punto de vista de la disponibilidad y de acuerdo a los cálculos realizados en el presente proyecto, el Sistema de Señalización de Cantón Móvil presenta una disponibilidad mayor, es decir, los fallos resultan menos frecuentes. Sin embargo, estos fallos tienen un mayor impacto en el sistema, ya que repercuten significativamente en la operación (por ejemplo, un fallo en el sistema de radio de un tren provoca la falta de localización permanente del mismo).

En ocasiones, esto obliga a la elección de Sistemas de Señalización Mixtos: Cantón Móvil + Cantón Fijo, en el que se introduce de nuevo el Equipamiento de Vía, funcionando como sistema de respaldo, lo que minimiza el impacto de los fallos pero aumenta de nuevo la inversión requerida.

Adicionalmente a estas consideraciones, y en aquellas ciudades donde el Sistema de Señalización de Cantón Móvil sea el sistema seleccionado, deberán analizarse cuidadosamente las consecuencias de los fallos de disponibilidad.



## 7 CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES

### 7.1 Conclusiones derivadas del análisis

Tras el análisis realizado en el presente proyecto, se han alcanzado las siguientes conclusiones que son enumeradas a continuación:

- Antes de la elección de cualquier Sistema de Señalización para una ciudad específica, es de vital importancia realizar un Plan Urbano de Movilidad realista que permita analizar la proyección de la demanda de viajeros en el futuro teniendo en cuenta factores tales como: planes urbanísticos perfil de la población, planes de creación de trabajo, etc. Esto, permitirá estimar la capacidad de la línea en el presente y en el futuro y la correcta elección del Sistema de Señalización ya que la capacidad de la línea, es uno de los factores limitantes a la hora de realizar la elección del Sistema de Señalización.
- En el caso de que el Plan Urbano de Movilidad concluyera que el Sistema de Señalización óptimo es un Sistema de Señalización de Cantón Móvil, debido a la demanda de viajeros presente o futura, no tendría sentido invertir en un Sistema de Señalización de Cantón Fijo, aunque éste resultara más barato, ya que la elección de un Sistema de Señalización erróneo y su posterior migración a un Sistema de Señalización más eficiente tendría una repercusión muy importante en costes. Una primera revisión de los Sistemas de Señalización instalados en las principales ciudades del mundo apoya esta conclusión ya que sólo ciudades como Londres, París o Madrid, con una gran demanda de viajeros han instalado y mantienen actualmente Sistemas de Señalización de Cantón Móvil.
- La disponibilidad del Sistema de Señalización de Cantón Móvil es significativamente mayor que en el caso del Sistema de Señalización de Cantón Fijo, pero el valor de disponibilidad no es un valor absoluto, puesto que la caracterización de los fallos debe incluir el impacto que tienen. Es decir, debemos relacionar el concepto de disponibilidad expresado como la probabilidad de fallo, con el concepto del impacto operacional que el fallo tiene. En el caso del Sistema de Señalización de Cantón Fijo, un fallo en el Sistema de Señalización del Equipamiento Embarcado permite operar en un modo de operación degradado, basado en la localización del tren mediante circuitos de vía, y en cambio, el mismo fallo en el Sistema de Señalización del Equipamiento Embarcado en Cantón Móvil provoca la pérdida total del tren, con el consiguiente impacto en la operación del Sistema de Señalización hasta que el fallo es resuelto o el tren se retira de servicio.
- El coste de mantenimiento es muy significativo en el cómputo del coste total del Sistema de Señalización ya que el mantenimiento es costoso y éste se realiza por un largo número de años. Por lo tanto, antes de la elección del Sistema de Señalización, deberá analizarse no sólo los costes de material y ejecución, sino el coste de mantenimiento, ya que éste puede decantar la decisión en uno u otro sentido.
- El coste de ejecución y mantenimiento de los sistemas más avanzados de señalización, es elevado debido a la necesidad de contar con personal muy especializado tanto en desarrollo como en pruebas y puesta en servicio. Este coste, con el tiempo, va disminuyendo, por lo que puede ser una buena elección, esperar el tiempo suficiente para obtener un Sistema de Señalización compatible con la demanda y controlado en costes.



- La capacidad de la línea está directamente vinculada con el trazado de la vía: velocidades máximas, radio de curvatura, gradiente, longitud de andenes, visibilidad de señales, posición de agujas, etc., por lo que deberán adecuadamente todas las fases del proyecto, ya que el diseño del Sistema de Señalización comienza en las fases de obra civil y no a posteriori.

## 7.2 Líneas de trabajo derivadas del presente proyecto

En el presente capítulo, se proponen futuras líneas de trabajo que podrían continuar con el análisis realizado en este proyecto.

Estas líneas de trabajo podrían ir encaminadas al análisis de los siguientes temas:

- Los Sistemas de Señalización Mixtos, compuestos por una solución combinada del Sistema de Señalización de Cantón Fijo y el Sistema de Señalización de Cantón Móvil, podrían ser analizados y comparados con el Sistema de Señalización de Cantón Móvil, a fin de determinar si estos sistemas podrían ofrecer un rendimiento parecido al Sistema de Señalización de Cantón Móvil, a un coste significativamente menor. Un ejemplo de este tipo de Sistemas Mixtos que podrían obtener un buen rendimiento a un coste menor sería el Sistema de Señalización compuesto por señales virtuales y circuitos de vía.
- Los modos degradados del Sistema de Señalización de Cantón Móvil podrían ser analizados a fin de profundizar en las opciones de operación y minimizar el impacto que éstos tienen en el sistema. Un ejemplo de estos escenarios es la pérdida de la radio por un tren que hace desaparecer por completo un tren al no existir un sistema de respaldo que lo localice. Deberían analizarse los escenarios y proponerse nuevas formas de operación que minimicen este impacto.



## 8 CAPÍTULO 8: BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- **Bibliografía:**

- EU Transport in Figures Statistical Pocket Book 2014, Comisión Europea
- Study to Support an Impact Assessment of the Urban Mobility Package 2013, Comisión Europea
- Ingeniería Ferroviaria, Francisco Javier González Fernández y Julio Fuentes Losa, Universidad Nacional de Educación a Distancia
- Ferrocarriles Metropolitanos , Tranvías, metros Ligeros y metros Convencionales, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
- European Railway Signalling, Institution of Railway Signal Engineers
- Infraestructuras Ferroviarias, Andrés López Pita, Universidad Politécnica de Cataluña
- Conceptos Ferroviarios Básicos – ADIF
- Vía en Placa – Aplicación a Entornos Metropolitanos, José Antonio Pañero Huerga
- Vía en Placa: Proceso Constructivo en Entornos Metropolitanos - Tesina Ricardo Lorenzo Mañas Estrader , Universidad de Cataluña
- Seminario de IRSE (Institution of Railway Signal Engineers): “Communications based train control”– Alan Rumsey
- Failure Reporting Analysis and Corrective Action System – FRACAS- Sematech
- Dinámica de los Trenes de Alta Velocidad , Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Alberto García Álvarez
- **Artículos de divulgación científica:**

Los Sistemas de señalización en el ferrocarril y su evolución, Fernando Montes, Doctor Ingeniero del ICAI

El ferrocarril y el teléfono, sistemas de señalización en España en 1922, José María Romeo López, Rafael Romeo Frías, Fundación Telefónica

- **Webs:**

Vía Libre

Ferropedia / Wikipedia



Museo del Ferrocarril

Railway Technical

Metro Madrid

Metro Barcelona

Metro Sevilla

Metro de Londres

Metro de París



## 9 CAPÍTULO 9: LISTA DE ACRÓNIMOS

A continuación, se incluye la lista de acrónimos utilizados a lo largo del proyecto:

| ACRÓNIMO | SIGNIFICADO   |
|----------|---|
| ATC      | Automatic Train Control                                 |
| ATP      | Automatic Train Protection                              |
| ATO      | Automatic Train Operation                               |
| GoA      | Grades of Automation                                    |
| UTO      | Unattended Train Operation                              |
| DTO      | Driverless Train Operation                              |
| CENELEC  | European Committee for Electrotechnical Standardization |
| SIL      | System Integrity Level                                  |
| FRACAS   | Failure Reporting and Corrective Action System          |
| FMEA     | Failure Modes and Effect Analysis                       |
| FMECA    | Failure Modes and Effect Critical Analysis              |
| MTBF     | Mean time between failures                              |
| MTTF     | Mean time to fail                                       |
| MTTR     | Mean time to repair                                     |